

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Dynamika mechanismu průmyslové pračky

The Dynamics of the Mechanism of the Washing Machine

Student:

Radek Holub

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

OSTRAVA 2015

Zadání bakalářské práce

Student:

Radek Holub

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Dynamika mechanismu průmyslové pračky
The Dynamics Of the Mechanism Of the Washing Machine

Zásady pro vypracování:

1. Popis problému.
2. Teorie - pohybová rovnice a její řešení.
3. Výpočtový model pro metodu konečných prvků.
4. Řešení modální analýzy.
5. Řešení harmonické analýzy.
6. Vyhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

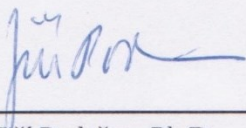
- [1] Brousil, J., Slavík, J., Zeman, V. : Dynamika. SNTL, Praha, 1989.
- [2] Juliš, K., Brepta, R. : Mechanika II. díl, dynamika. SNTL, Praha, 1987.
- [3] Bittnar, Z., Rericha, P. : Metoda konečných prvků v dynamice konstrukcí. SNTL, Praha, 1981.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Ostravě 18.05.2015

Radek Holub

Radek Holub

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě archivována v Ústřední knihovně VŠB-TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že bibliografické údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo, bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.05.2015

Radek Holub
.....

podpis

Jméno a příjmení studenta:

Radek Holub

Adresa trvalého pobytu studenta:

Jičínská 271, Nový Jičín, 741 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HOLUB, R. *Dynamika mechanismu průmyslové pračky - bakalářská práce*. OSTRAVA: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2015, 53 s. Vedoucí práce: Podešva, J.

Bakalářská práce se zabývá dynamikou pohybu průmyslové pračky. Hlavním úkolem této práce je vytvoření MKP modelu mechanismu pračky a zjištění jeho dynamických vlastností a rozkmitu v provozních podmínkách. V úvodu práce je popsán historický vývoj praček. V práci je také spočítán příklad analytického řešení podobné úlohy. Poté jsou v jedné kapitole popsány jednotlivé součásti mechanismu pračky. Následující kapitola se zabývá vytvořením modelu pro komerční výpočetní software ANSYS Workbench 15.0, ve kterém bude model analyzován. V dalších dvou kapitolách jsou popsány všechny prováděné analýzy a jejich výsledky. V poslední kapitole je vyhodnocení celé práce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HOLUB, R. *The Dynamics of the Mechanism of the Washing Machine – bachelor thesis*. OSTRAVA: Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2015, 53 p. Thesis head: Podešva, J.

The thesis deals with the dynamics of the mechanism of the washing machine. The main task of this thesis is creating FEM model of the mechanism of the washing machine and finding out its dynamics characteristics and amplitude in operating conditions. In introduction of the thesis historical development of washing machine is described. An example of analytical solution of a similar task is also calculated in thesis. Each component of mechanism of the washing machine is described. Following chapter deals with creating model for commercial computational software ANSYS Workbench 15.0, in which the model will be analyzed. In next chapters all conducted analysis and their results are described. In the last chapter is evaluation of the whole thesis.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD.....	10
1.1 VÝVOJ PRAČKY	10
1.2 VÝROBCI PRŮMYSLOVÝCH PRAČEK V ČESKÉ REPUBLICE	11
1.2.1 MERON A.S.	11
1.2.2 PRIMUS CE S.R.O.	12
1.2.3 VVM – IPSO S.R.O. FULNEK	12
2 POPIS PROBLÉMU.....	13
3 TEORIE - POHYBOVÁ ROVNICE A JEJÍ ŘEŠENÍ	14
3.1 Úvod	14
3.1.1 MODÁLNÍ ANALÝZA.....	15
3.1.2 DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	15
3.2 PŘÍKLAD ANALYTICKÉHO VÝPOČTU KMITÁNÍ SE TŘEMI STUPNI VOLNOSTI	16
3.2.1 MODÁLNÍ ANALÝZA.....	17
3.2.2 HARMONICKÁ ANALÝZA	21
4 DÍLČÍ KOMPONENTY	23
4.1 VNITŘNÍ BUBEN PRAČKY	23
4.2 RÁM.....	23
4.3 VNĚJŠÍ BUBEN PRAČKY	24
4.4 SESTAVA HRÍDELE	24
4.5 VÝPOČET VELIKOSTI VZDUCHOVÉHO MĚCHU	24
4.6 URČENÍ VELIKOSTI KOEFICIENTU TLUMENÍ	28
5 VÝPOČTOVÝ MODEL PRO METODU KONEČNÝCH PRVKŮ	29
5.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	29

5.2	VÝPOČTOVÝ MODEL	30
6	<u>ŘEŠENÍ MODÁLNÍ ANALÝZY</u>	<u>32</u>
1.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 1,850 Hz.....	33
2.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 1,858 Hz.....	34
3.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 2,471 Hz.....	35
4.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 2,658 Hz.....	36
5.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 2,905 Hz.....	37
6.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 3,971 Hz.....	38
7.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 23,597 Hz.....	39
8.	VLASTNÍ TVAR S VLASTNÍ FREKVENCÍ 28,832 Hz.....	40
7	<u>ŘEŠENÍ HARMONICKÉ ANALÝZY</u>	<u>41</u>
7.1	ZOBRAZENÍ POLE POSUVŮ V OSE X	43
7.2	ZOBRAZENÍ ČASOVÉHO PRŮBĚHU POSUNUTÍ BODU	45
7.3	ZOBRAZENÍ TRAJEKTORIE DVOU BODŮ.....	46
8	<u>VYHODNOCENÍ A ZÁVĚR.....</u>	<u>48</u>
	<u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u>	<u>50</u>
	<u>PODĚKOVÁNÍ.....</u>	<u>51</u>
	<u>PŘÍLOHY</u>	<u>52</u>

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

A_i	[cm ²]	Efektivní plocha vzduchového měchu
b	[m]	Rozteč silenbloků
F_1	[N]	Síla působící na jeden montážní bod pračky
F_{Di}	[N]	Direkční síla v pružině
F_{OD}	[N]	Odstředivá síla
F_T	[N]	Doporučené zatížení měchu
f	[N]	Sloupcová matice budících sil
f_i	[Hz]	Frekvence
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
h_S	[m]	Výška středu
h_T	[m]	Výška těžiště
I_T	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti k těžišti
J	[m, m, °, m, m, °]	Sloupcový vektor jednotlivých amplitud
J_{celk}	[m, m, °]	Celkový vektor amplitud
K	[N/m]	Matice tuhosti
k_i	[N/m]	Tuhost pružiny ve směru i
M	[kg]	Matice hmot
m	[kg]	Hmotnost pračky
m_1	[kg]	Hmotnost působící na jeden montážní bod
m_p	[kg]	Hmotnost pračky
m_n	[kg]	Hmotnost nevývažku
n	[ot/min]	Otáčky
n_B	[-]	Počet montážních bodů
p	[bar]	Skutečný tlak v měchu
p_T	[bar]	Tlak uvnitř měchu
q	[m]	Sloupcový vektor posunutí

\ddot{q}	[m/s ²]	Sloupcový vektor zrychlení
q_A	[m]	Výchylka kosinové složky budící síly
q_B	[m]	Výchylka sinové složky budící síly
r_n	[m]	Excentricita nevývažku
t	[s]	Čas
$u_{(x)a}$	[mm]	Velikost amplitudy
$u_{(x)t}$	[mm]	Posunutí ve směru osy x v čase t
V	[-]	Matice vlastních tvarů
V_1	[-]	Matice vlastních tvarů normovaná na jedničku
V_i	[cm ³]	Vnitřní objem měchu
x, y	[m]	Posunutí ve směru souřadnice
x, y, φ	[-]	Označení souřadného systému
\ddot{x}, \ddot{y}	[m/s ²]	Zrychlení ve směru souřadnice
x_A, y_A	[m]	Posunutí od kosinové složky budící síly
x_B, y_B	[m]	Posunutí od sinusové složky budící síly
γ	[°]	Fázový posuv
Δl_i	[mm]	Prodloužení (zkrácení) pružiny
λ_i	[s ⁻²]	Vlastní číslo
π	[-]	Ludolfovo číslo
φ_1	[°]	Fázový posuv
φ	[rad]	Úhel natočení ve směru souřadnice
$\ddot{\varphi}$	[rad/s ⁻²]	Úhlové zrychlení ve směru souřadnice
φ_A	[rad]	Natočení od kosinové složky budící síly
φ_B	[rad]	Natočení od sinové složky budící síly
ω	[s ⁻¹]	Kruhová frekvence budící síly
Ω_i	[s ⁻¹]	Vlastní kruhová frekvence

1 ÚVOD

1.1 Vývoj pračky

Jakmile se lidé začali oblékat do tkaných oděvů, vznikala i nutnost praní prádla.



Obr. 1 Prací stroj

V minulosti patřilo praní prádla mezi nejnamáhavější práci v domácnostech. Zpočátku se pro praní prádla používala pouze říční voda, ve které se prádlo máčelo, otloukalo o kameny a poté se máchalo. Později se do vody přidávaly různé látky, například mýdla, které proces praní urychlily a usnadnily. Velkým skokem vpřed bylo vynalezení valchy, které se vyráběly ze dřeva, plechů a později i z umělých hmot. Protože praní bylo stále velmi namáhavou prací, začaly se vyrábět různé prací stroje, které fungovaly

na principu valchy. Při takovém praní se však prádlo rychle opotřebovávalo. S postupem času se mýdla zdokonalovala a přišlo se na to, že stačí, aby se prádlo ve vodě jen vířilo. Od té doby se vyráběly nové druhy pracích strojů, u kterých pohyb prádla zajišťovaly lopatky nebo různé kolíky, které byly většinou poháněny klikou. Tyto prací stroje se vyráběly ze dřeva a s použitím kovových součástí. Teprve později vznikly různé firmy a dílny, které se specializovaly pouze na výrobu pracích strojů. Pomocí ždímaček se z vypraného prádla odstraňovala voda.



Obr. 2 Valcha a necky

Velkým skokem pro pračky bylo využití elektrické energie, která sloužila jako pohon do malých elektromotorů. Nejprve se tyto pohony montovaly na stávající typy praček, ale později se vyvíjely nové druhy praní (tzv. vířivý) a zcela jiné typy praček, které se začaly vyrábět z kovů. S cílem uspořit co nejvíce času a práce vedlo výrobce praček k nápadu ohřívání vody přímo v pračce. Aby se ušetřil i čas při ždímání, začaly se používat odstředivky, které byly jako samostatný stroj, ale později byly nezbytnou součástí tělesa pračky. Protože tělesa pračky byly montovány napevno, tak byly tyto pračky velmi robustní. Později se však tělesa pračky začaly montovat na silentbloky, které dokázaly zachytit silné

vibrace způsobené nerovnoměrným rozložením prádla v pracím bubnu. Díky tomu se mohly vyrábět mnohem lehčí plechové pračky. Prádlo se ovšem muselo prát, odstřeďovat i ždímat za přítomnosti člověka, a proto bylo nutné tyto procesy nějak automatizovat. A tento problém byl vyřešen vývojem automatické pračky. Dnes je automatická pračka nezbytnou součástí každé domácnosti. Průmyslové pračky, které se používají v hotelnictví, nemocnicích či v armádě mohou mít kapacitu až 210 kg špinavého prádla.



Obr. 3 Automatická pračka

1.2 Výrobci průmyslových praček v České republice

1.2.1 Meron a.s.

Firma Meron a.s. byla založena již v roce 1991. Sídlo firmy je ve Fulneku, ale centrum obchodní činnosti (prodej výrobků, náhradních dílů, servis a výroba) je umístěno v Mankovicích u Oder. Průmyslové pračky firmy Meron jsou rozděleny do několika kategorií:

- Průmyslové pračky neodpružené – Tyto pračky jsou vhodným řešením v provozu menších prádelen. Vyznačují se vysokou životností a nízkou pořizovací cenou. Rozsah otáček odstředění je do 500 ot/min. Pračky vyžadují pevné ukotvení k betonové podlaze s dostatečnou nosností.
- Průmyslové pračky odpružené - Jsou určeny pro praní prádla v průmyslových prádelnách, hotelech, penzionech, nemocnicích, domovech sociální péče a obdobných provozech. Jejich výhodou je vysoký stupeň odstředění. Pračky o menší kapacitě není nutno kotvit k podlaze.
- Průmyslové pračky hygienické – Jsou určeny pro praní silně znečištěného prádla v profesionálních provozech a prádelnách, nemocnicích, domovech sociální péče, domovech důchodců a dalších provozech, kde je požadováno oddělení znečištěného a vypraného prádla dělicí mezistěnou.
- Průmyslové pračky malokapacitní – Jsou optimálním řešením pro malé provozy, jako jsou penziony, mateřské školy, kadeřnické salóny, malokapacitní prádelny. Vyznačují se ekonomickým provozem, vysokou kvalitou a životností.

1.2.2 Primus CE s.r.o.

Společnost Primus byla založena v roce 1911 v Belgii jako výrobce praček a myček pro domácnost. Od roku 1970 se firma zaměřila na vybavení komerčních prádelen. Sortiment společnosti Primus pokrývá celé spektrum vybavení prádelny od odpružených praček s vysokými otáčkami odstředění, přes neodpružené pračky, hygienické bariérové odpružené pračky, až po profesionální bubnové sušiče a korytové i válcové žehliče. Díky síti vlastních distributorů a servisních partnerů, se společnost zaměřuje na široké spektrum koncových uživatelů: mincovníkové prádelny, vlastní soukromé prádelny, komerční prádelny, hotelové prádelny, prádelny v sociální sféře, nemocnicích, věznicích. Primus také dodává zařízení průmyslovým prádelnám, větším soukromým prádelnám a čistírnám.

Primus dnes patří mezi přední výrobce profesionální prádelenské techniky na světě.

1.2.3 VVM – IPSO s.r.o. Fulnek

VVM – IPSO s.r.o. Fulnek je česká společnost, jejíž prioritou je strojírenská výroba, dále prodej, montáž a servis průmyslové, prádelenské a čistírenské techniky.

VVM – IPSO s.r.o. zajišťuje především celkový prodej a servis na území ČR a SR, výrobu sestav a dílů průmyslových prádelenských strojů ve Fulneku. Díky své kvalitě mají tyto průmyslové, prádelenské a čistírenské stroje těchto značek stále větší oblibu u zákazníků, o čemž svědčí vzrůstající prodej jednotlivých strojů a zařízení i kompletně vybavených prádelen a chemických čistíren v ČR i SR.

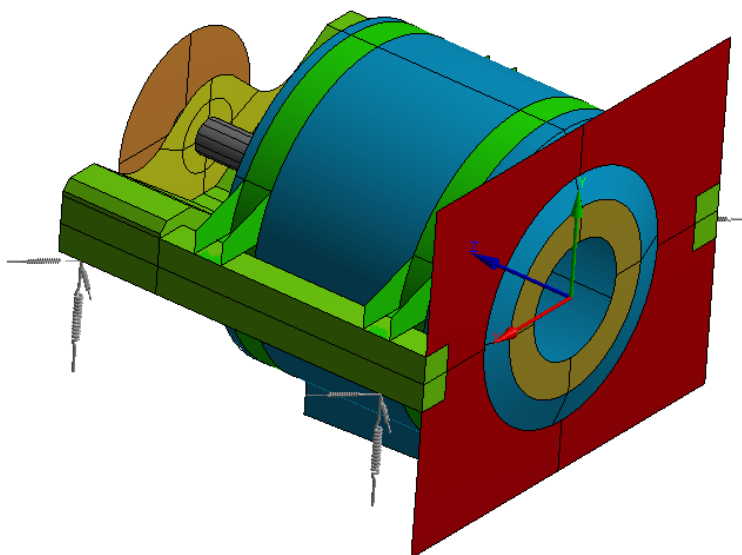
Společnost dlouhodobě spolupracuje s celou řadou dalších firem dodávajících různé technologie pro průmyslové, prádelenské a čistírenské provozy a pro řadu z nich je zástupce pro ČR a SR, jako např. JENSEN, KAAAN, SILC, PONY, GRANDIMPIANTI, BIEFFE, HAWO aj.

Hlavní snahou společnosti VVM – IPSO s.r.o. je garantovat zákazníkům nejvyšší kvalitu poskytovaných služeb, což dokládá i certifikát DIN EN ISO 9001/2000 č. 01 100 045135 pro nákup, prodej, montáž a servis průmyslové, prádelenské technologie včetně dodání náhradních dílů ze dne 3. 6. 2004, vydaný firmou TÜV Industrie Service GmbH.

2 Popis problému

Bakalářská práce se zabývá dynamikou pohybu průmyslové pračky. Hlavním úkolem této práce je vytvoření MKP modelu (modelu pro metodu konečných prvků) mechanismu pračky a zjištění jeho dynamických vlastností a rozkmitu v provozních podmínkách.

Při praní prádla v pračce se vnitřní buben pračky otáčí s rychlostí 33 ot/min, při takto malých otáčkách však nevznikají žádné velké vibrace. Problém nastává až u ždímání, kdy se buben otáčí s rychlostí 600 ot/min. Tyto otáčky odpovídají budící frekvenci 10 Hz. Proto je třeba zjistit, jestli se některá z vlastních frekvencí mechanismu pračky neblíží



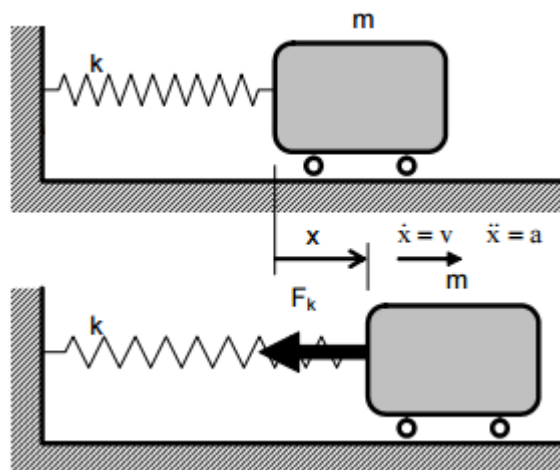
Obr. 4 Geometrický model mechanismu pračky

této budící frekvenci. Pokud by se tak stalo, mohlo by dojít k rezonanci. To znamená, že vlastní frekvence mechanismu je shodná nebo se blíží k frekvenci budící síly. Při rezonanci mohou i malé pravidelné síly způsobovat velké amplitudy kmitů. Na Obr. 4 je zobrazen model mechanismu průmyslové pračky, na kterém bude provedena modální analýza (zjištění vlastních tvarů a vlastních frekvencí), která nebude tlumená. Model, na kterém bude provedena harmonická analýza (zjištění odezvy mechanismu pračky na buzení) je téměř stejný, jen jsou v něm nadefinovány koeficienty tlumení v tlumičích. V tomto modelu bude zahrnuto i tlumení v osmi tlumičích. Pokud by nastala rezonance, bylo by nutné změnit konstrukci mechanismu tak, aby se vlastní frekvence mechanismu a frekvence budící síly nerovnaly. Druhým možným řešením by pak mohla být změna budící frekvence, to znamená změnit otáčky při ždímání.

3 TEORIE - POHYBOVÁ ROVNICE A JEJÍ ŘEŠENÍ

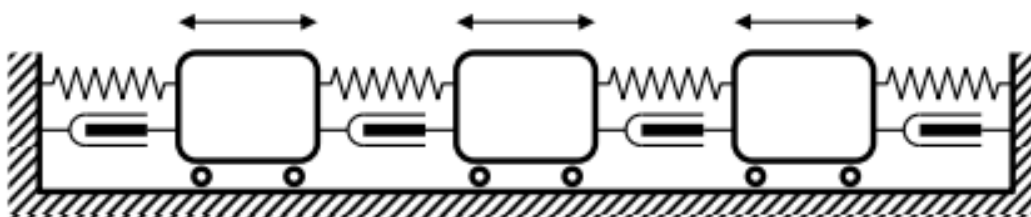
3.1 Úvod

U mechanického modelu podélného kmitání koná těleso přímočarý pohyb a jeho poloha je určena jedinou souřadnicí, jedná se tedy o pohyb s jedním stupněm volnosti. Na Obr. 5 je znázorněno schéma mechanického modelu s netlumeným volným kmitáním. Skládá se z tuhého tělesa, které má hmotnost m a pohybuje se po vodorovné, dokonale hladké podložce, která nemá žádný odpor prostředí. Těleso je k rámu uchyceno pomocí nehmotné pružiny, která má tuhost k . Tuhost pružiny je dána poměrem síly a deformace.



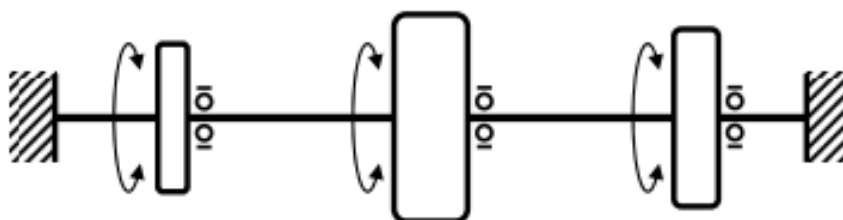
Obr. 5 Kmitání s 1° volnosti

Pro zohlednění podstatných vlastností reálných mechanických soustav zpravidla nevystačíme s mechanickými modely s jedním stupněm volnosti. Používáme pak modely s dvěma a více stupni volnosti. Příkladem takových modelů je například model podélného kmitání tří vozíčků (Obr. 6), které mají hmotnost m_1 , m_2 a m_3 a jejich poloha je určena třemi nezávislými souřadnicemi x_1 , x_2 a x_3 .



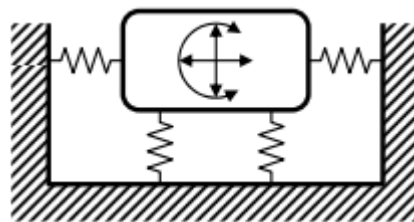
Obr. 6 Model podélného kmitání s více stupni volnosti

Druhým příkladem pak může být rotační kmitání tří kotoučů (Obr. 7), které mají momenty setrvačnosti I_1 , I_2 a I_3 a jejich poloha (úhel natočení) je určena třemi nezávislými souřadnicemi φ_1 , φ_2 a φ_3 .



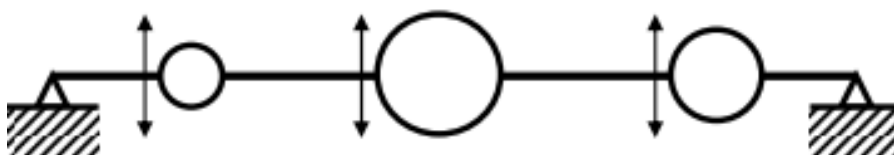
Obr. 7 Model rotačního kmitání s více stupni volnosti

Třetím příkladem pak může být model rovinného kmitání (Obr. 8), kdy má těleso hmotnost m a moment setrvačnosti I a jeho poloha je dána třemi nezávislými souřadnicemi x , y a φ . Tento případ pak bude spočítán v následujícím analytickém výpočtu.



Obr. 8 Model rovinného kmitání

Dalším příkladem pak může být model ohybového kmitání (Obr. 9) a poloha hmotných bodů m_1 , m_2 a m_3 je určena třemi nezávislými souřadnicemi, průhybu y_1 , y_2 a y_3 .



Obr. 9 Model ohybového kmitání s více stupni volnosti

3.1.1 Modální analýza

V každé konstrukci stroje musí být posouzeno, zda některá část soustavy, ve většině případů se jedná o rotující část, není provozována v režimu, ve kterém by mohlo dojít ke sblížení frekvence kmitání k vlastní frekvenci celého stroje. Jestliže by se frekvence sblížily, mohlo by dojít vlivem rezonance k rozkmitání nebo až k úplnému zničení konstrukce.

V našem případě se jedná o vnitřní buben průmyslové pračky, který se při ždímání prádla otáčí vysokou rychlostí a tím vznikají vibrace.

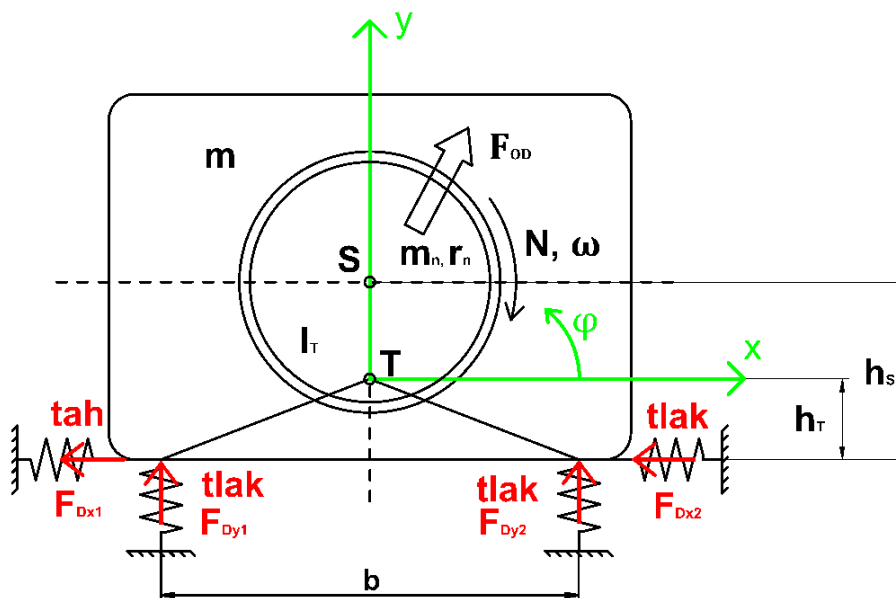
3.1.2 Dynamická analýza

Stanovení dynamické odezvy využívá nástrojů návazných na modální analýzu. Výsledkem analýzy je dynamická odezva struktury na různé druhy dynamického zatížení (v tomto případě se jedná o buzení vzniklé rotací nevyvážky). V simulované soustavě je možné nadefinovat různé posloupné události, jako je budící síla, tlumení nebo vynucené posunutí. Výstupem analýzy mohou být záznamy polohy, rychlosti, zrychlení atd. v závislosti na čase. Místa odměřování hodnot jsou libovolně volitelná.

Při volbě dynamického buzení je možné vybírat z harmonických i neharmonických kmitů nebo definovat vlastní průběh buzení. Existuje několik druhů analýz, jako například přechodová, frekvenční, náhodná, spektrum odezvy nebo kvazi-statická.

3.2 Příklad analytického výpočtu kmitání se třemi stupni volnosti

Průmyslová pračka o celkové hmotnosti m je uložena na čtyřech pryžových silenblocích. Jejich vodorovná rozteč je b . Těžiště pračky T leží uprostřed vodorovné rozteče b a ve výšce h_T nad rovinou uložení pračky. Moment setrvačnosti pračky k těžišti je I_T . Pružné uložení na pryžových silenblocích představují dvě složky tuhosti. Ve svislém směru (silenblok je stlačován) je tuhost k_y , ve vodorovném směru (dochází ke zkosení silenbloku) je tuhost k_x . Zadané hodnoty odpovídají jednomu silenbloku. Těleso pračky má tři stupně volnosti, okamžitá poloha pračky je dána souřadnicemi těžiště x , y a úhlem natočení φ . Vyřešte vlastní frekvence a vlastní tvary pračky, vlastní tvary normujte na jedničku. Charakter každého vlastního tvaru demonstруйте graficky (poměr posunutí a natočení).



Obr. 10 Schéma pračky a naznačení směrových sil

Součástí pračky je prací buben, rotující otáčkami n . Nevývaha náplně je m_n , uložená na poloměru r_n . Tomu odpovídá odstředivá síla F_{ob} , rotující společně s bubnem. Střed bubnu S je ve výšce h_s nad rovinou uložení pračky. Vyřešte ustálené vynucené kmitání buzené odstředivou silou, tedy amplitudy jednotlivých souřadnic x_a , y_a a φ_a (v případě úhlu uveďte ve stupních).

$$k_x = 170 \frac{N}{m} \quad k_y = 570 \frac{N}{m} \quad b = 1,2 \, m \quad m_n = 20 \, kg \quad n = 800 \frac{ot.}{min}$$

$$m = 1500 \, kg \quad I_T = 900 \, kg \cdot m^2 \quad h_T = 0,7 \, m \quad r_n = 0,9 \, m \quad h_s = 0,9 \, m$$

Nyní následuje volba, zda bude v pružinách předpokládán tah nebo tlak a podle toho pak budou zakresleny směrové síly v pružinách (Obr. 10).

3.2.1 Modální analýza

Cílem modální analýzy je zjistit tolik vlastních tvarů a vlastních frekvencí, kolik má soustava nezávislých souřadnic. V našem případě chceme zjistit 3 vlastní tvary a 3 vlastní frekvence, které budou seřazeny vzestupně a které jsou jednoznačně určeny nezávislými souřadnicemi x , y a φ .

Sestavení pohybové rovnice pro každý směr souřadného systému (v pořadí x , y a φ).

$$\begin{aligned}m \cdot \ddot{x} &= -F_{Dx1} - F_{Dx2} \\m \cdot \ddot{y} &= F_{Dy1} + F_{Dy2} \\I_T \cdot \ddot{\varphi} &= -F_{Dx1} \cdot h_T - F_{Dx2} \cdot h_T - F_{Dy1} \cdot \frac{b}{2} + F_{Dy2} \cdot \frac{b}{2}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Uvolnění soustavy a nahrazení pružin směrovými silami, které jsou dány součinem tuhosti a prodloužením (zkrácením) pružiny.

$$\begin{aligned}F_{Dx1} &= 2 \cdot k_x \cdot \Delta l_{x1} & F_{Dy1} &= 2 \cdot k_y \cdot \Delta l_{y1} \\F_{Dx2} &= 2 \cdot k_x \cdot \Delta l_{x2} & F_{Dy2} &= 2 \cdot k_y \cdot \Delta l_{y2}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Vyjádření prodloužení pružin pomocí souřadnic zvoleného souřadného systému.

$$\begin{aligned}\Delta l_{x1} &= x + \varphi \cdot h_T & \Delta l_{y1} &= -y + \varphi \cdot \frac{b}{2} \\ \Delta l_{x2} &= x + \varphi \cdot h_T & \Delta l_{y2} &= -y - \varphi \cdot \frac{b}{2}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Dosazení vyjádřených prodloužení pružin (3.3) do rovnic směrových sil (3.2) a následné dosazení směrových sil (3.2) do pohybových rovnic (3.1).

$$\begin{aligned}m \cdot \ddot{x} &= -2 \cdot k_x \cdot (x + \varphi \cdot h_T) - 2 \cdot k_x \cdot (x + \varphi \cdot h_T) \\m \cdot \ddot{y} &= 2 \cdot k_y \cdot \left(-y + \varphi \cdot \frac{b}{2}\right) + 2 \cdot k_y \cdot \left(-y - \varphi \cdot \frac{b}{2}\right) \\I \cdot \ddot{\varphi} &= -2 \cdot k_x \cdot (x + \varphi \cdot h_T) \cdot h_T - 2 \cdot k_x \cdot (x + \varphi \cdot h_T) \cdot h_T \\&\quad - 2 \cdot k_y \cdot \left(-y + \varphi \cdot \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{b}{2} + 2 \cdot k_y \cdot \left(-y - \varphi \cdot \frac{b}{2}\right) \cdot \frac{b}{2}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Roznásobením všech závorek v pohybových rovnicích a převedením všech členů pohybových rovnic na jednu stranu a následným vytknutím souřadnic získáme tyto rovnice.

$$\begin{aligned}
 m \cdot \ddot{x} + x \cdot (4 \cdot k_x) + y \cdot 0 + \varphi \cdot (4 \cdot k_x \cdot h_T) &= 0 \\
 m \cdot \ddot{y} + x \cdot 0 + y \cdot (4 \cdot k_y) + \varphi \cdot 0 &= 0 \\
 I \cdot \ddot{\varphi} + x \cdot (4 \cdot k_x \cdot h_T) + y \cdot 0 + \varphi \cdot (4 \cdot k_x \cdot h_T^2 + k_y \cdot b^2) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Zapsání tuhosti do maticového tvaru. Matice tuhosti je diagonálně dominantní matice (v hlavní diagonále jsou vždy kladná nenulová čísla) a je symetrická podle hlavní diagonály.

$$\begin{aligned}
 K &= \begin{bmatrix} 4 \cdot k_x & 0 & 4 \cdot k_x \cdot h_T \\ 0 & 4 \cdot k_y & 0 \\ 4 \cdot k_x \cdot h_T & 0 & 4 \cdot k_x \cdot h_T^2 + k_y \cdot b^2 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \\
 K &= \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & k_{13} \\ 0 & k_{22} & 0 \\ k_{31} & 0 & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 680\,000 & 0 & 476\,000 \\ 0 & 2\,280\,000 & 0 \\ 476\,000 & 0 & 1\,154\,000 \end{bmatrix} \frac{N}{m}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Zapsání hmot do maticového tvaru. Matice hmot je diagonální matice (v hlavní diagonále jsou čísla a všude jinde jsou nuly).

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\,500 & 0 & 0 \\ 0 & 1\,500 & 0 \\ 0 & 0 & 900 \end{bmatrix} kg \tag{3.7}$$

Soustavu pohybových rovnic (3.5) lze také zapsat v maticovém tvaru.

$$M \cdot \ddot{q} + K \cdot q = 0 \tag{3.8}$$

Rozepsáním matic bude pohybová rovnice vypadat následovně.

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_T \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & k_{13} \\ 0 & k_{22} & 0 \\ k_{31} & 0 & k_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.9}$$

Kde matice hmot a matice tuhosti jsou čtvercové matice a matice zrychlení a matice posuvů jsou sloupcové (vektorové) matice. Na pravé straně musí být sloupcová (vektorová) matice nul.

Aby bylo možné získat netriviální řešení, musí být frekvenční determinant roven nule.

$$FD = |K - \lambda \cdot M| = 0 \tag{3.10}$$

Rozepsáním matic bude frekvenční determinant vypadat následovně.

$$FD = \begin{vmatrix} k_{11} - \lambda \cdot m & 0 & k_{13} \\ 0 & k_{22} - \lambda \cdot m & 0 \\ k_{31} & 0 & k_{33} - \lambda \cdot I \end{vmatrix} = 0 \quad (3.11)$$

Determinant by mohl být vypočítán například pomocí Sarrusova pravidla. Vynásobením všech závorek a úpravami získáme kubickou rovnici. Výsledkem této rovnice jsou vlastní čísla, která seřadíme vzestupně.

V tomto příkladu budou vlastní čísla vypočítána v softwaru Mathcad 11 Enterprise Edition pomocí následujících příkazů.

$$A := M^{-1} \cdot K \quad (3.12)$$

Kde M^{-1} je inverzní matice k matici hmot M a K je matice tuhosti.

$$\lambda := \text{sort}(\text{eigenvals}(A)) \quad (3.13)$$

Kde funkce *eigenvals* vypočítá hodnoty vlastních čísel a funkce *sort* je vzestupně seřadí. Hodnoty vlastních čísel jsou tedy následující.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 285 \text{ s}^{-2} \\ \lambda_2 &= 1\,451 \text{ s}^{-2} \\ \lambda_3 &= 1\,520 \text{ s}^{-2} \end{aligned} \quad \lambda = \begin{Bmatrix} 285 \\ 1\,451 \\ 1\,520 \end{Bmatrix} \text{ s}^{-2} \quad (3.14)$$

Odmocněním vlastních čísel získáme velikost vlastních kruhových frekvencí.

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 16,88 \text{ s}^{-1} \\ \Omega_2 &= 38,09 \text{ s}^{-1} \\ \Omega_3 &= 38,99 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad \Omega = \begin{Bmatrix} 16,88 \\ 38,09 \\ 38,99 \end{Bmatrix} \text{ s}^{-1} \quad (3.15)$$

Vydělením vlastních kruhových frekvencí číslem $(2 \cdot \pi)$ získáme frekvence.

$$\begin{aligned} f_1 &= 2,687 \text{ Hz} \\ f_2 &= 6,063 \text{ Hz} \\ f_3 &= 6,205 \text{ Hz} \end{aligned} \quad f = \begin{Bmatrix} 2,687 \\ 6,063 \\ 6,205 \end{Bmatrix} \text{ Hz} \quad (3.16)$$

Uspořádáním vlastních tvarů do matice získáme tzv. matici vlastních tvarů neboli modální matici.

$$i := 1..3 \quad (3.17)$$

$$V^{(i)} := \text{eigenvec}(A, \lambda_i)$$

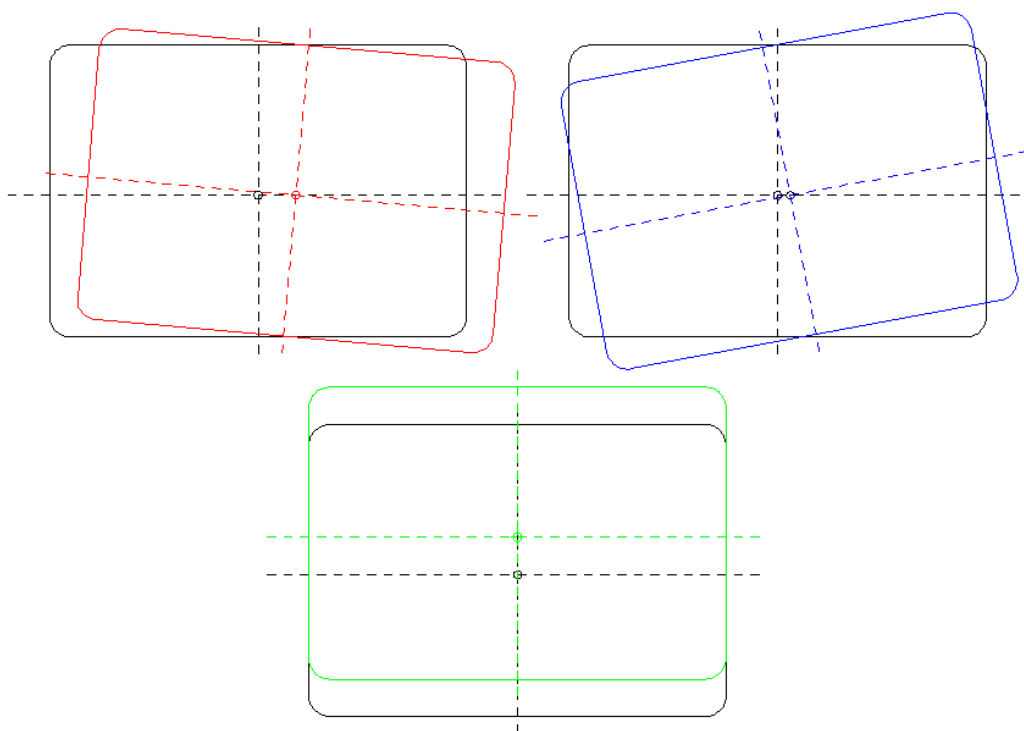
Kde i značí počet vlastních tvarů, matice A je vypočítaná matice v rovnici (3.12) a λ značí vlastní číslo. Funkce *eigenvec* vypočítá hodnoty vlastních vektorů. Výsledkem je tedy tato matice vlastních tvarů.

$$V = \begin{bmatrix} -0,883 & 0,303 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,469 & 0,953 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Nyní je potřeba matici vlastních tvarů normovat, což znamená vydělit nebo vynásobit matici V stejným číslem. V tomto případě provedeme normování na jedničku, takže každý sloupec matice V vydělíme největším číslem v daném sloupci a získáme tuto matici.

$$V_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0,318 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,53 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Na Obr. 11 jsou barevně znázorněny vlastní tvary a černou barvou původní poloha.



Obr. 11 Grafické znázornění vlastních tvarů

3.2.2 Harmonická analýza

Cílem harmonické analýzy je zjištění odezvy součásti nebo soustavy na buzení (v našem případě se jedná o buzení odstředivou silou na pračku).

Vynucené harmonické kmitání bez tlumení je popsáno homogenní diferenciální rovnicí ve tvaru.

$$M \cdot \ddot{q} + K \cdot q = f \quad (3.20)$$

Kde M je matice hmot, K je matice tuhosti a f je sloupcová matice působících sil.

$$f = \begin{pmatrix} F_{OD} \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ F_{OD} \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ -F_{OD} \cdot (h_S - h_T) \cdot \cos(\omega \cdot t) \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Výchylka q je dána tímto vztahem.

$$q = q_A \cdot \cos(\omega \cdot t) + q_B \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.22)$$

A druhá derivace výchylky, tedy zrychlení, vypadá takto.

$$\ddot{q} = -q_A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) - q_B \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.23)$$

Nyní dosadíme rovnice (3.22) a (3.23) do rovnice (3.20) a získáme následující rovnici.

$$\begin{aligned} & -M \cdot [q_A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) + q_B \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)] + \\ & + K \cdot [q_A \cdot \cos(\omega \cdot t) + q_B \cdot \sin(\omega \cdot t)] = f \end{aligned} \quad (3.24)$$

Po roznásobení a následné úpravě získáme tuto rovnici.

$$(K - M \cdot \omega^2) \cdot q_B \cdot \sin(\omega \cdot t) + (K - M \cdot \omega^2) \cdot q_A \cdot \cos(\omega \cdot t) = f \quad (3.25)$$

Nyní je třeba ještě dopočítat kruhovou frekvenci budící síly ω z následujícího vztahu.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (3.26)$$

Dále musíme dopočítat velikost odstředivé síly F_{OD} .

$$F_{OD} = m_n \cdot r_n \cdot \omega^2 \quad (3.27)$$

V následujícím kroku oddělíme od sebe sinové složky a kosinové složky a získáme tyto 2 soustavy 3 rovnic o 3 neznámých.

$$\begin{aligned}(k_{11} - m \cdot \omega^2) \cdot x_B + 0 + k_{13} \cdot \varphi_B &= 0 \\ 0 + (k_{22} - m \cdot \omega^2) \cdot y_B + 0 &= F_{OD} \\ k_{31} \cdot x_B + 0 + (k_{33} - I_T \cdot \omega^2) \cdot \varphi_B &= 0\end{aligned}\tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}(k_{11} - m \cdot \omega^2) \cdot x_A + 0 + k_{13} \cdot \varphi_A &= F_{OD} \\ 0 + (k_{22} - m \cdot \omega^2) \cdot y_A + 0 &= 0 \\ k_{31} \cdot x_A + 0 + (k_{33} - I_T \cdot \omega^2) \cdot \varphi_A &= F_{OD} \cdot (h_S - h_T)\end{aligned}\tag{3.29}$$

Vyřešením rovnic získáme ustálené vynucené kmitání buzené odstředivou silou, tedy amplitudy jednotlivých souřadnic.

$$J = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ \varphi_A \\ x_B \\ y_B \\ \varphi_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,013 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0,214^\circ \\ 0 \text{ m} \\ -0,015 \text{ m} \\ 0^\circ \end{pmatrix}\tag{3.30}$$

Na závěr můžeme tyto složkové hodnoty sečíst a získáme celkové ustálené vynucené kmitání buzené odstředivou silou.

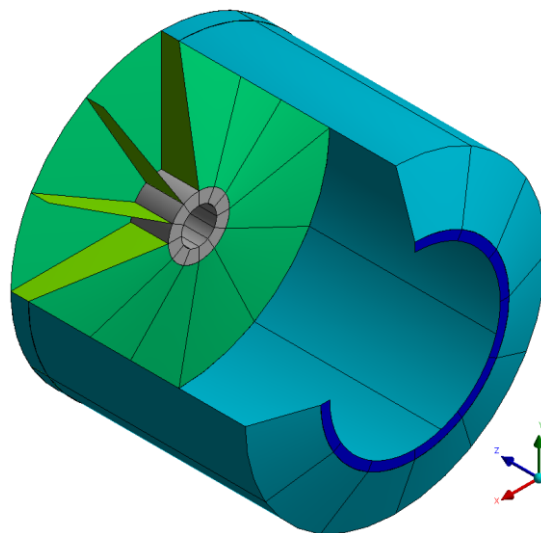
$$J_{celk} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,013 \text{ m} \\ -0,015 \text{ m} \\ 0,214^\circ \end{pmatrix}\tag{3.31}$$

4 DÍLČÍ KOMPONENTY

V této kapitole jsou podrobněji popsány jednotlivé díly a součásti pračky. Dále je v této kapitole návrhový výpočet vzduchového měchu, který je navrhován podle hmotnosti soustavy pračky a podle počtu použitých měchů. Nakonec je pomocí aproximace proveden dopočet potřebného koeficientu tlumení pro tlumiče z hodnot, které byly naměřeny výrobcem tlumičů. Na obrázcích jsou barevně rozlišené tloušťky jednotlivých částí.

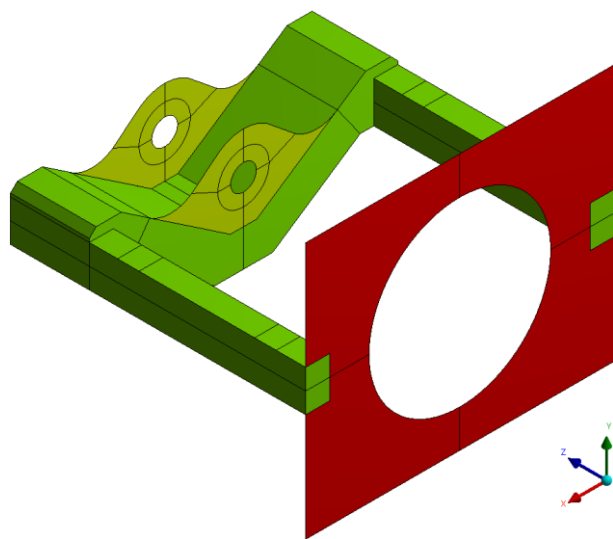
4.1 Vnitřní buben pračky

Vnitřní buben pračky (Obr. 12) se skládá z předního čela bubnu (světle modře a tmavě modře), z pláště bubnu (světle modře), z vnitřního náboje bubnu (šedě), z dvou zadních čel (zeleně) a z dvanácti žebër (žlutě). Zadní čelo je zdvojené a vyztužené dvanácti žebry, které jsou přivařeny k náboji vnitřního bubnu a slouží jako výztuha bubnu. Vnitřní buben je taková část pračky, která se otáčí a do které se vkládá prádlo určené k praní.



Obr. 12 Vnitřní buben pračky

4.2 Rám

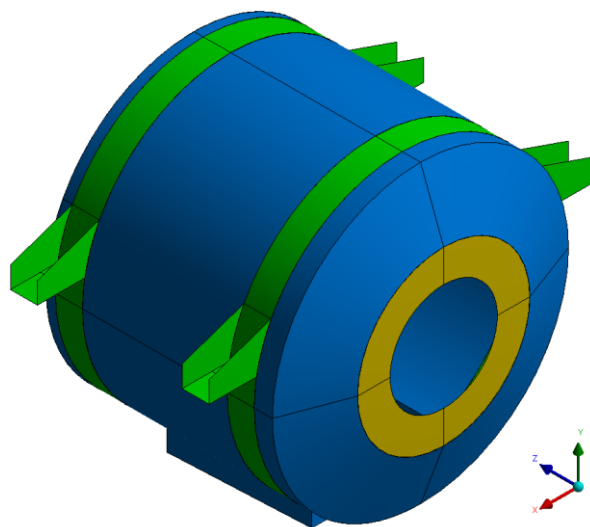


Obr. 13 Rám

Rám pračky (Obr. 13) se skládá z vidličky (zeleně), z předního čela (červeně) a ze dvou zadních čel (žlutě). K vidličce je pomocí čtyř úchytů přivařen vnější buben pračky. Dvě zadní čela slouží k uložení hřídele a ložisek. Přední čelo slouží k uchycení dvířek pračky a také je na něm namontován ovládací panel. Rám je dále spojen se základní konstrukcí pračky pomocí vzduchových měchů, které byly navrženy pomocí návrhového výpočtu uvedeném v katalogu [3]. Dále je rám spojen se základní konstrukcí s tlumiči.

4.3 Vnější buben pračky

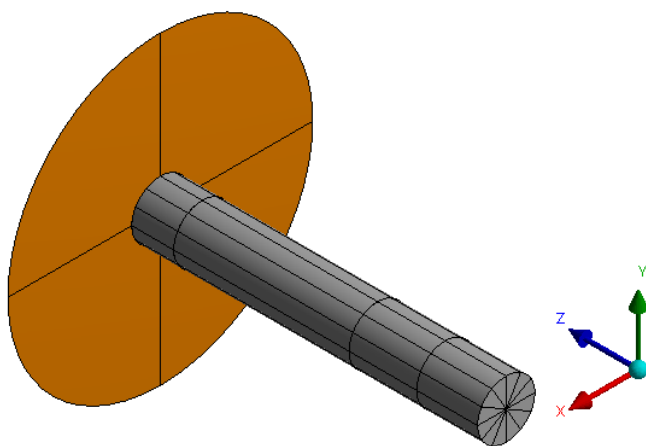
Vnější buben pračky (Obr. 14) se skládá z předního čela bubnu (modře), z vnitřního vyztuženého čela (béžově) z pláště bubnu (modře), ze dvou vyztužujících pásků po obvodu bubnu (zeleně), ze zadního čela, ze čtyř úchytů (zeleně) a z vany (modře), která je umístěna dole. Vnější buben je přivařen k rámu pomocí čtyř úchytů, které jsou navařeny k plášti vnějšího bubnu v místě, kde jsou vyztužující pásy. Vnitřní část předního čela je vyztužena a je na ní připevněna těsnící guma, která při zavření dvírek zabrání úniku vody z vnějšího bubnu pračky. Zespolu bubnu je připevněna vana, která slouží ke shromáždění vody a k jejímu vypuštění.



Obr. 14 Vnější buben pračky

4.4 Sestava hřídele

Sestava hřídele (Obr. 15) se skládá ze samotné hřídele (šedě) a z řemenice (béžově). Hřídel je na jednom konci spojena s nábojem vnitřního bubnu a na druhém konci se nachází řemenice, na kterou se za pomoci řemenu přenáší krouticí moment z motoru na hřídel a pohání vnitřní buben pračky. Střední část hřídele je uložena v rámu.



Obr. 15 Sestava hřídele

4.5 Výpočet velikosti vzduchového měchu

S použitím katalogu [3] firmy Firestone je spočítána pomocí návrhového výpočtu konstrukční výška vzduchového měchu a jeho tuhost ve vertikálním a horizontálním směru. Návrhový výpočet je počítán z celkové hmotnosti sestavy pračky a výsledkem výpočtu je konstrukční výška vzduchového měchu a velikost vnitřního tlaku vzduchového měchu.

Stanovení zatížení na jeden montážní bod.

$$m_1 = \frac{m_P}{n_B} = \frac{2\,380}{4} = 595\,kg \quad (4.1)$$

Tuto hodnotu zatížení na každý montážní bod můžeme převést na sílu pomocí následujícího vztahu.

$$F_1 = m_1 \cdot g = 595 \cdot 9,81 = 5\,837\,N = 5,84\,kN \quad (4.2)$$

Volba konstrukční
výšky vzduchového
měchu dle tlaku
(v katalogu doporučují
volit tlak v rozmezí od 4
do 6 bar) a dle vypočítané
hodnoty zatížení F_1 (je
doporučeno volit nejbližší
hodnotu). Dle Tab. 1 jsem
zvolil výšku vzduchového
měchu 120 mm a vnitřní

Assembly Height (mm)	Volume @ 7 BAR (cu cm)	EFF Area @ 7 BAR (cm sq)	kN Force				
			@ 3 BAR	@ 4 BAR	@ 5 BAR	@ 6 BAR	@ 7 BAR
180	1896	74	1,91	2,71	3,49	4,40	5,19
160	1708	92	2,51	3,46	4,41	5,47	6,43
140	1491	106	3,01	4,09	5,18	6,37	7,43
120	1255	119	3,44	4,64	5,85	7,15	8,33
100	992	132	3,84	5,16	6,49	7,92	9,23
80	703	144	4,22	5,65	7,08	8,62	10,06

Tab. 1 Silová tabulka k určení konstrukční výšky měchu

tlak 5 bar. Doporučené zatížení F_T tohoto vzduchového měchu je 5,85 kN.

Výpočet efektivní plochy vzduchového měchu.

$$A = \frac{F_T \cdot 100}{p_T} = \frac{5,85 \cdot 100}{5} = 117\,cm^2 \quad (4.3)$$

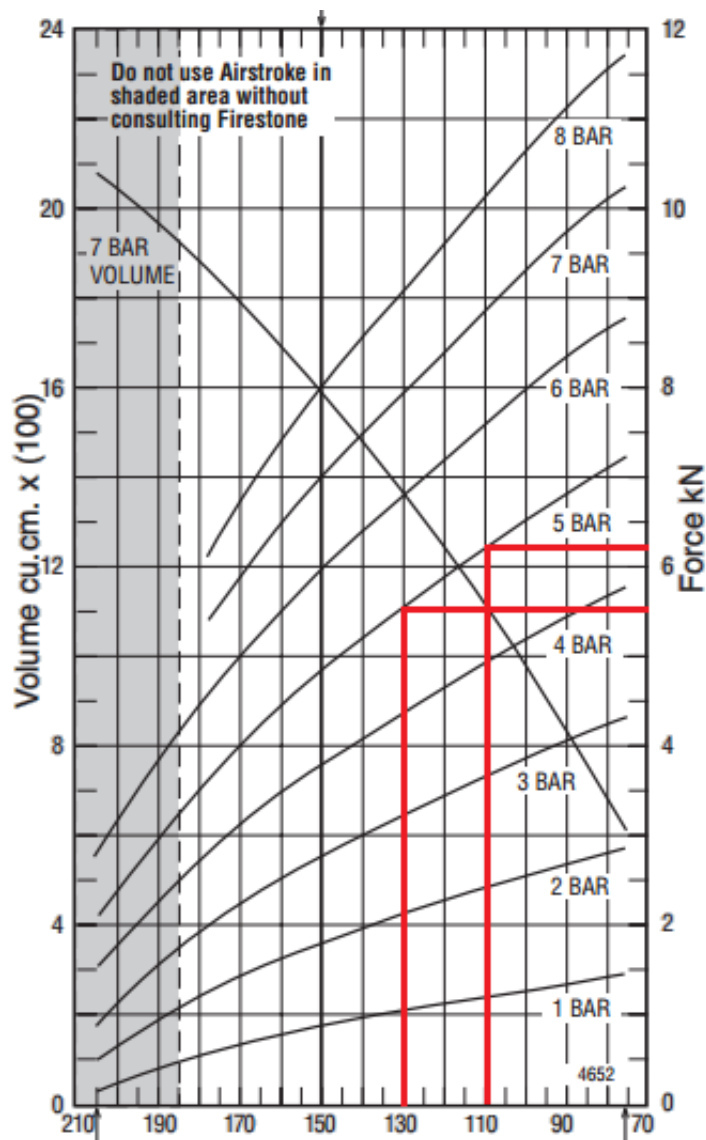
Výpočet skutečného tlaku uvnitř vzduchového měchu.

$$p = \frac{F_1 \cdot 100}{A} = \frac{5,89 \cdot 100}{117} = 4,99\,bar \quad (4.4)$$

Vzorec pro výpočet dynamické tuhosti vzduchového měchu.

$$k = \frac{[(p + 1,01) \cdot 100] \cdot \left[\frac{A_c}{10\,000} \cdot \left(\frac{V_1}{V_c} \right)^{1,38} - \frac{A_e}{10\,000} \cdot \left(\frac{V_1}{V_e} \right)^{1,38} \right]}{0,02} - \frac{\left[101 \cdot \frac{(A_c - A_e)}{10\,000} \right]}{0,02} \quad (4.5)$$

Nyní je nutné z Graf 1 vyčíst několik důležitých hodnot pro následující výpočet vertikální tuhosti vzduchového měchu. Náš skutečný tlak uvnitř vzduchového měchu je 4,99 bar a nejbližší tlak zobrazený na grafu je 5 bar, takže potřebujeme vyčíst příslušné hodnoty z křivky označené hodnotou 5 bar. Z grafu vyčteme dvě hodnoty zatížení, a to pro vzduchový měch s konstrukční výškou větší o 10 mm (F_{130}) a menší o 10 mm (F_{110}). Tyto hodnoty pak dosadíme do rovnice (4.6) a získáme účinné plochy vzduchového měchu A_c a A_e . Dále můžeme z grafu vyčíst 2 hodnoty objemu (V_c a V_e), a to opět pro vzduchový měch s konstrukční výškou větší o 10 mm a menší o 10 mm. Tyto hodnoty lze také vypočítat z hodnot v Tab. 1.



Graf 1 Statická data

Výpočet účinné plochy vzduchového měchu A_c a A_e dle následujících vztahů.

$$A_c = \frac{F_{110} \cdot 100}{p} = \frac{6,2 \cdot 100}{5,03} = 123,3 \text{ cm}^2$$

$$A_e = \frac{F_{130} \cdot 100}{p} = \frac{5,5 \cdot 100}{5,03} = 109,3 \text{ cm}^2$$

(4.6)

Hodnoty vnitřních objemů v měchu V_1 , V_c a V_e .

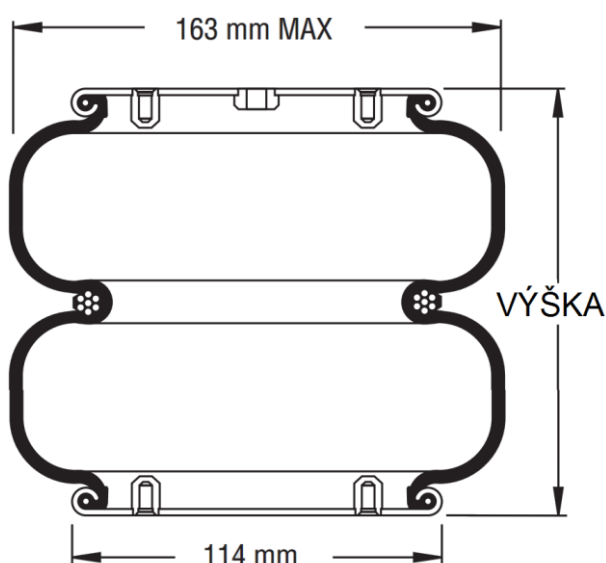
$$V_1 = 1\,255 \text{ cm}^3 \quad V_c = 1\,124 \text{ cm}^3 \quad V_e = 1\,373 \text{ cm}^3$$

Nyní můžeme dosadit do rovnice (3,1) a získáme vertikální tuhost pružiny.

$$k_y = \frac{[(4,99 + 1,01) \cdot 100] \cdot \left[\frac{123,3}{10\,000} \cdot \left(\frac{1\,255}{1\,124} \right)^{1,38} - \frac{109,3}{10\,000} \cdot \left(\frac{1\,255}{1\,373} \right)^{1,38} \right]}{0,02} - \frac{\left[101 \cdot \frac{(123,3 - 109,3)}{10\,000} \right]}{0,02} = 134 \text{ kN/m} \quad (4.7)$$

Vertikální tuhost měchů se pohybuje od 0,2 až 0,5 násobku vertikální tuhosti.

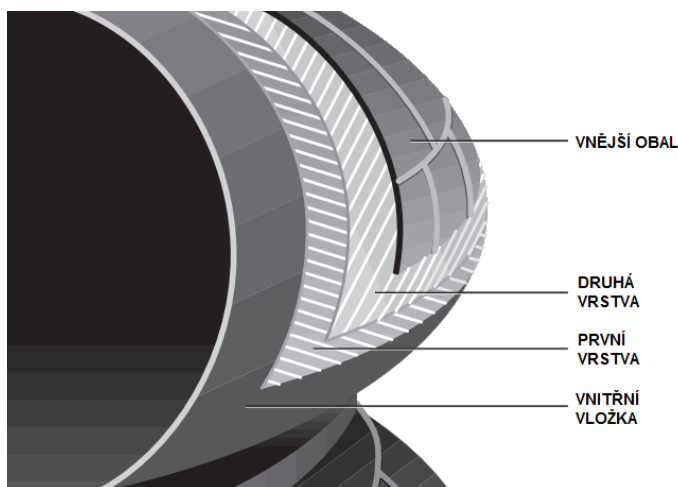
$$k_{x,z} = (0,2 \div 0,5) \cdot 135 = 27 \div 67,5 \text{ kN/m} \quad (4.8)$$



Obr. 16 Schéma vzduchového měchu a jeho základní konstrukční rozměry

Hlavním rozměrem vzduchového měchu je jeho konstrukční výška. Tato výška se mění v závislosti na typu vzduchového měchu a pohybuje se v rozmezí od 25 mm až do 580 mm. Tyto měchy mají v sobě vyvrtány závit o velikosti M8 x 1,25 a v katalogu doporučují dotahovat šrouby s točivým momentem 25 N·m. V horní části je také ventil, který je určený k přívodu vzduchu. Vzduchové měchy se používají nejen u různých vibračních strojů a průmyslových praček, ale také například u horských kol.

Plášť vzduchového měchu se skládá ze čtyř vrstev. Vnitřní vložka je vyrobena z kalandrované gumy. Druhá vrstva se skládá z gumy, která je vyztužena tkaninou. První vrstva je z pryže vyztužené tkaninou, ale vlákna tkaniny musí být mezi sebou pod specifickým úhlem vzhledem k druhé vrstvě. Vnější obal je opět z kalandrované gumy.



Obr. 17 Konstrukce měchu

4.6 Určení velikosti koeficientu tlumení

K určení koeficientu tlumení tlumiče jsem získal od vedoucího práce tabulku naměřených dat. Následně jsem tyto data aproximoval pomocí vhodné křivky a získal jsem hodnoty koeficientu tlumení pro různé otáčky.

Z tabulky můžeme vyčíst, že vstupními daty jsou otáčky n a výstupními daty jsou útlumové síly v tlumiči F a rychlost kmitání v . Koeficient tlumení b a výchylka kmitu C pak byly dopočítány.

n [1/min]	F [N]	v [mm/s]	b [N·s/m]	C [mm]
10	98	16	6 125	15,28
25	216,5	40	5 413	15,28
50	420	79	5 316	15,09
75	565,5	119	4 752	15,15
100	655	157	4 172	14,99
120	706,5	190	3 718	15,12
150	774	235	3 294	14,96

Tab. 2 Hodnoty, naměřené ve zkušební tlumiči

Jelikož je tato tabulka měřena při otáčkách v rozmezí 10 až 150 ot/min a my potřebujeme pro výpočet otáčky s hodnotou 600 ot/min, je třeba tyto data aproximovat a získat tak námi potřebné hodnoty. Provedl jsem aproximaci podle přímky

n [1/min]	F [N]	v [mm/s]	b [N·s/m]	C [mm]
200	1 096	314	3 488	15,00
300	1 583	471	3 361	14,99
400	2 070	628	3 297	14,99
500	2 557	785	3 259	14,98
600	3 044	941	3 234	14,98

Tab. 3 Aproximované hodnoty

$y = k \cdot x + q$ pro útlumovou sílu F a pro rychlost kmitání v v závislosti na otáčkách. Ostatní hodnoty jsem opět dopočítal a získal jsem hodnotu koeficientu tlumení 3 234 N·s/mm.



Obr. 18 Tlumič P40 x 130 D

Na Obr. 18 je zobrazen tlumič P40 x 130 D, který je použit pro tlumení pračky. Jedná se o tlumič s uchycením O – O. Průměr horního a dolního oka je 16 mm. Délka stlačeného tlumiče je 295 mm a délka roztaženého tlumiče je 425 mm. Hmotnost tlumiče je 3,75 kg.

5 VÝPOČTOVÝ MODEL PRO METODU KONEČNÝCH PRVKŮ

V této kapitole bude popsán princip metody konečných prvků (MKP). Dále budou podrobněji popsány použité prvky a jejich oblast použití.

5.1 Metoda konečných prvků

V tomto výpočtu bude počítáno pouze s problematikou lineární pružnosti. Je třeba dodat, že tato metoda není omezena jen na tuto problematiku, ale lze ji využít také při řešení mnoha fyzikálních problémů. Lineární teorie pružnosti vychází z předpokladu malých posuvů, malých přetvoření a z platnosti Hookeova zákona.

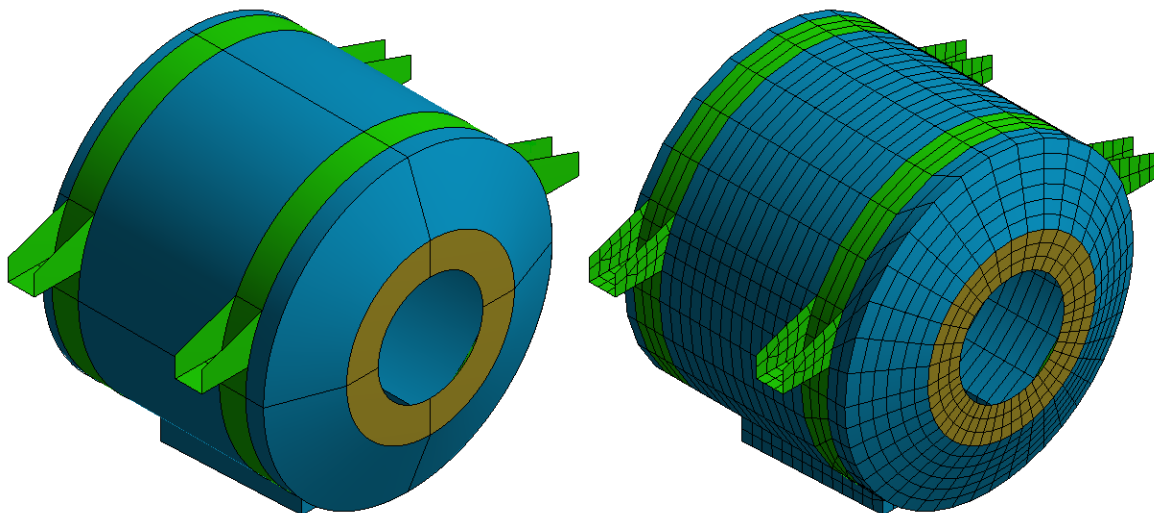
Základním principem metody konečných prvků je rozložení tělesa na menší části (elementy, konečné prvky) na kterých je analýza poměrně jednoduchá. Postup metody konečných prvků můžeme vyjádřit v šesti krocích.

1. Rozdělení oblasti na malé podoblasti, tzv. konečné prvky, elementy.
2. Definice chování jednotlivých elementů.
3. Opětovné složení jednotlivých elementů a získání soustavy rovnic popisující chování celé oblasti.
4. Definice okrajových podmínek.
5. Vlastní řešení. Získání primárních neznámých (posuvy).
6. Získání sekundárních výsledků (deformace, napětí).

V praxi na vymodelované geometrii vytvoříme síť. Většinou se síť generuje automaticky, ale existuje mnoho různých funkcí, pomocí kterých si dokážeme síť přizpůsobit tak, jak potřebujeme. Definici chování jednotlivých elementů a opětovné složení jednotlivých elementů zpracuje software. O těchto dvou krocích se však můžeme dozvědět více informací z dokumentace, která je dodávána se softwarem. Definice správných okrajových podmínek je podmínkou ke správnému řešení a proto bychom měli mít potřebné znalosti v daném oboru. Vlastní řešení opět provádí samotný software, my však můžeme určit, jakou metodu výpočtu použije, a tím můžeme také ovlivnit čas potřebný k vyřešení úlohy. Získání sekundárních výsledků je pak na nás, ale opět platí stejné pravidlo jako pro definici okrajových podmínek. Jednou z nejdůležitějších věcí je tedy znalost a také zkušenost v oboru, do kterého tento řešený problém spadá.

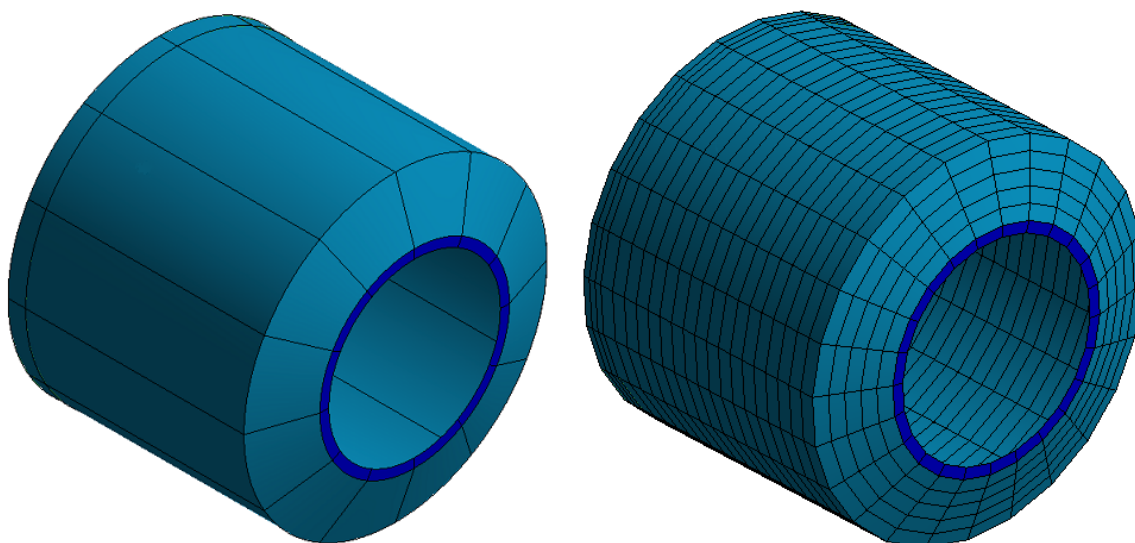
5.2 Výpočtový model

Úloha bude řešena za pomoci komerčního konečno-prvkového softwaru ANSYS v prostředí Workbench 15.0. Při výpočtu je použit materiál s modulem pružnosti v tahu $E = 200 \text{ GPa}$ a s Poissonovým číslem $\mu = 0,3$. Výpočet budeme řešit pomocí MKP a je tedy nutné vytvořit konečno-prvkový model, který se bude skládat ze dvou typů prvků.



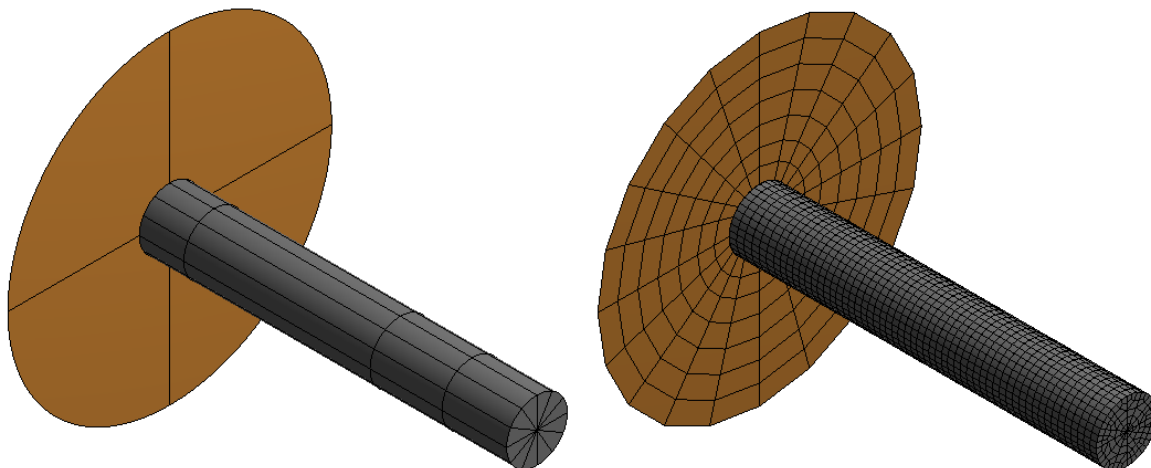
Obr. 19 Geometrický model (vlevo) a vysítovaný model (vpravo) vnějšího bubnu

Nejpoužívanějším prvkem v této práci je skořepinový prvek (shell), který je nejsložitějším 2D prvkem. Tyto prvky přenášejí v každém uzlu až 6 stupňů volnosti, jedná se o 3 posuvy a o 3 natočení. Využívají se nejvíce při analýze plechových konstrukcí a u těles, u kterých je jeden rozměr menší než ostatní. Při tvorbě modelu ze skořepinového prvku je nutno používat střednice z objemového modelu. Skořepiny jsou v nejjednodušším tvaru definovány materiálem a tloušťkou. Skořepinovým prvkem je nahrazen vnější buben (Obr. 19), rám (Obr. 22), řemenice (Obr. 21) a vnitřní buben (Obr. 20).



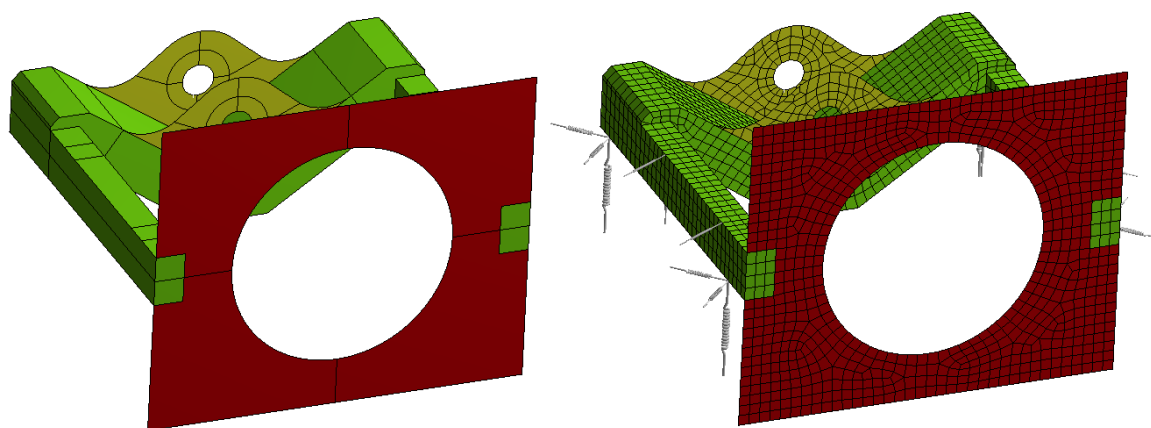
Obr. 20 Geometrický model (vlevo) a vysítovaný model (vpravo) vnitřního bubnu

Druhým používaným prvkem v této práci je solid prvek (objemový, neboli 3D prvek). Kdybychom použili v celém modelu solid prvek, měl by náš mnohem více elementů a výpočet by se značně prodloužil. Tento prvek se používá poměrně často, protože výpočtář má od konstruktérů většinou k dispozici geometrii (například ve formátu iges, step, parasolid atd.) a tento model pak zjednoduší a využije k dalšímu výpočtu. Solid prvek nám v tomto modelu reprezentuje hřídel (Obr. 22) a také náboj vnitřního bubnu.



Obr. 21 Geometrický model (vlevo) a vysíťovaný model (vpravo) hřídele s řemenicí

Dále je potřeba do modelu zahrnout pružné uložení pomocí vzduchových měchů a také nadefinovat tlumič zadáním koeficientu tlumení. K tomuto účelu slouží prvek spring, který se chová buď jako pružina, nebo jako tlumič. Záleží, co tímto prvkem nahrazujeme a jakou veličinu do tohoto prvku zadáme. V případě potřeby je možno do jednoho prvku nadefinovat jak tuhost, tak i koeficient tlumení. V našem případě bude použito 12 pružin, z nichž 4 jsou svislé a mají tuhost 134 kN/m a 8 pružin je vodorovných s tuhostí 60 kN/m. Těchto 12 pružin reprezentuje 4 vzduchové měchy. Dále bylo použito 8 tlumičů, z nichž 4 jsou svislé a 4 téměř vodorovné a všechny mají koeficient tlumení 3 234 N s/mm.



Obr. 22 Geometrický model (vlevo) a vysíťovaný model (vpravo) rámu

6 ŘEŠENÍ MODÁLNÍ ANALÝZY

Cílem modální analýzy je zjistit vlastní tvary a vlastní frekvence soustavy, na kterou nepůsobí žádná dynamická odezva. Modální analýza byla provedena na netlumeném modelu. Výsledkem modální analýzy je prvních 8 vlastních frekvencí, které jsou seřazeny vzestupně. Nutno podotknout, že tato soustava nemá jen 8 vlastních frekvencí. Další frekvence jsou však velmi vysoké a nejsou pro nás důležité. Prvních 6 vlastních frekvencí má docela nízkou hodnotu, protože se jedná o kmitání soustavy jako celku. V případě prvních šesti vlastních frekvencí se jedná o posuvy soustavy ve směru os souřadného systému, o rotace kolem os souřadného systému nebo o kombinaci těchto pohybů.

Protože v každém vlastním tvaru vychází jiné maximální posuvy, bývá zvykem každý vlastní tvar normovat, to znamená vydělit nebo vynásobit stejným číslem. Hodnoty se sice změní, ale jejich poměry zůstanou zachovány. Existuje mnoho možností, jak se dá normovat vlastní tvar. V praxi se však používají dva základní způsoby normování. Prvním je normování podle matice hmot a druhým je normování na jedničku, které v této práci použijeme. Princip je jednoduchý, celý vlastní tvar vydělíme největším číslem (v případě že největší číslo má záporné znaménko, tak dělíme i se záporným znaménkem, abychom získali kladné číslo) ve vlastním tvaru. Výsledkem pak je, že největší číslo ve vlastním tvaru je 1 a ostatní čísla jsou v příslušném poměru menší.

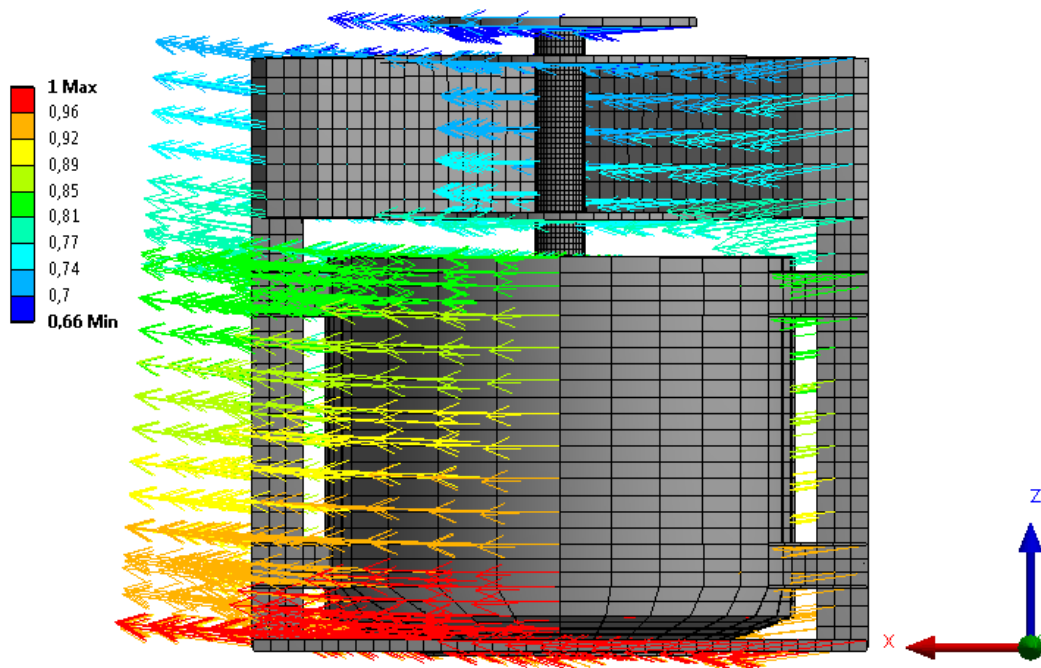
Vlastní tvar	Frekvence [Hz]	Animace
1.	1,850	Mode_1.avi
2.	1,858	Mode_2.avi
3.	2,471	Mode_3.avi
4.	2,658	Mode_4.avi
5.	2,905	Mode_5.avi
6.	3,971	Mode_6.avi
7.	23,597	Mode_7.avi
8.	28,832	Mode_8.avi

Tab. 4 Vlastní tvary, frekvence a animace

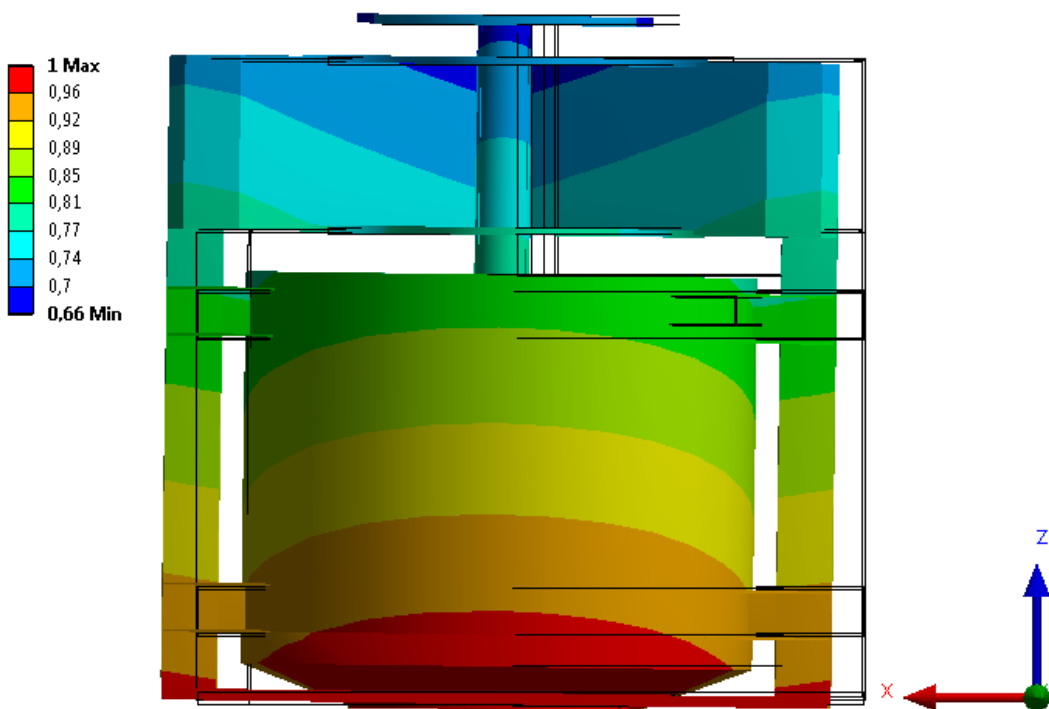
Na následujících stránkách bude podrobněji popsán pohyb prvních osmi vlastních tvarů a každý z nich bude vyobrazen na dvou obrázcích. Na prvním bude vykreslena poloha soustavy v původní poloze a směr elementů budou zobrazovat vektory. Na druhém obrázku bude soustava zobrazena v posunuté poloze a v tom samém obrázku budou zobrazeny hrany soustavy v původní poloze. Aby byly obrázky co nejvíce přehledné, byly skryty vizualizace pružin.

1. vlastní tvar s vlastní frekvencí 1,850 Hz

Soustava se pohybuje ve směru osy x a také se mírně pootáčí kolem svislé osy y.



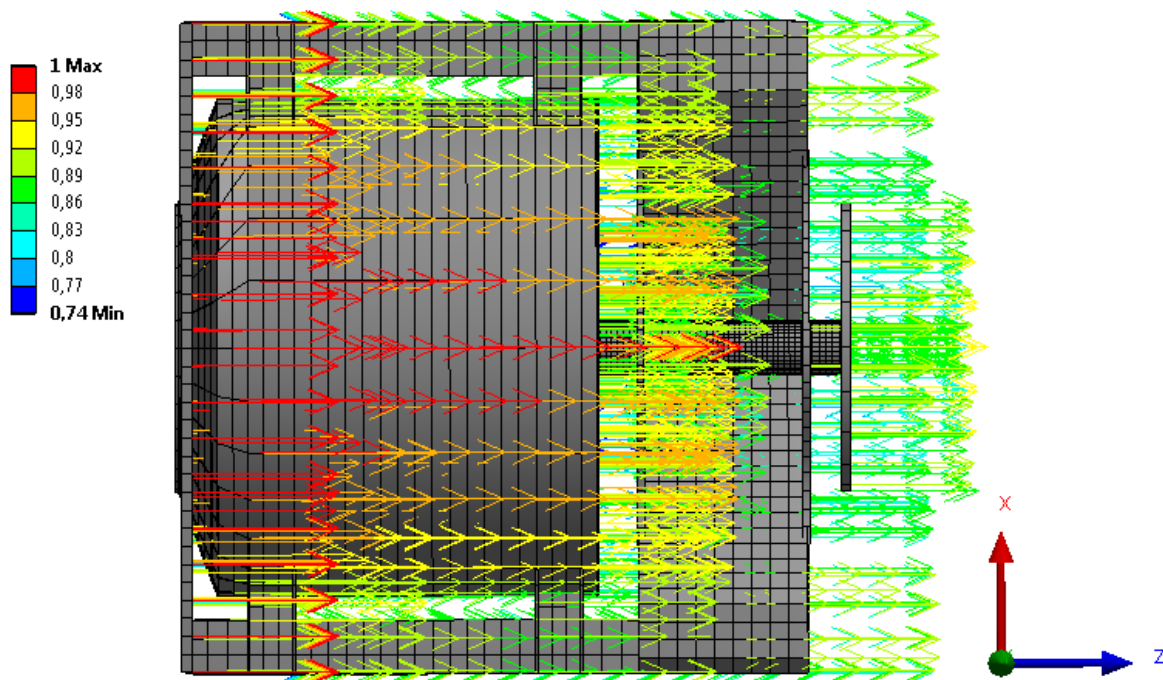
Obr. 23 Vektorové zobrazení 1. vlastního tvaru



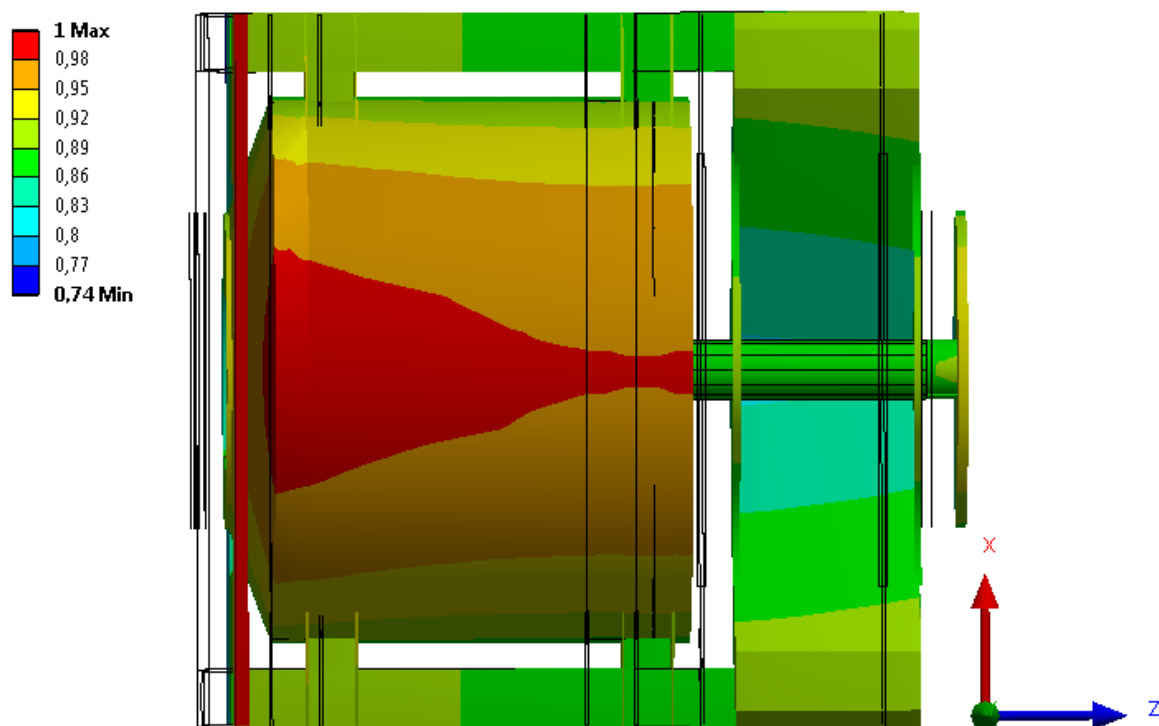
Obr. 24 Zobrazení pole posuvů 1. vlastního tvaru

2. vlastní tvar s vlastní frekvencí 1,858 Hz

Hlavním pohybem soustavy je pohyb ve směru osy z. Soustava se také mírně natáčí kolem osy x.



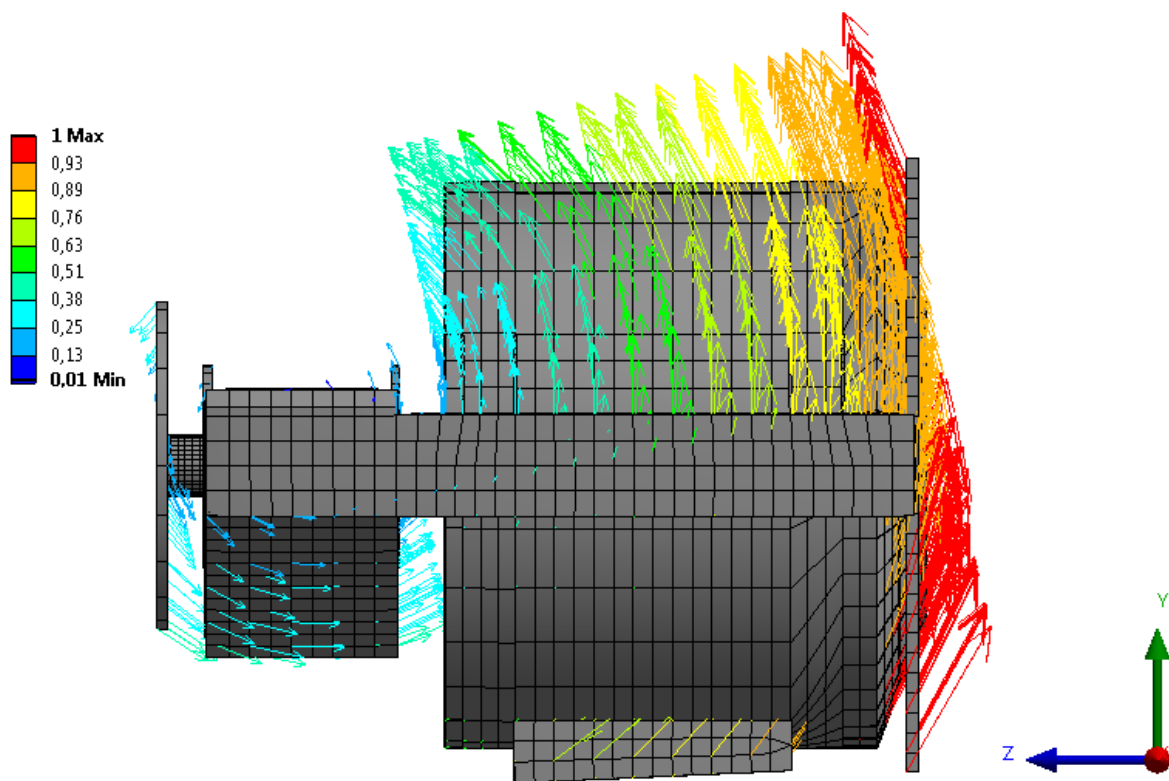
Obr. 25 Vektorové zobrazení 2. vlastního tvaru



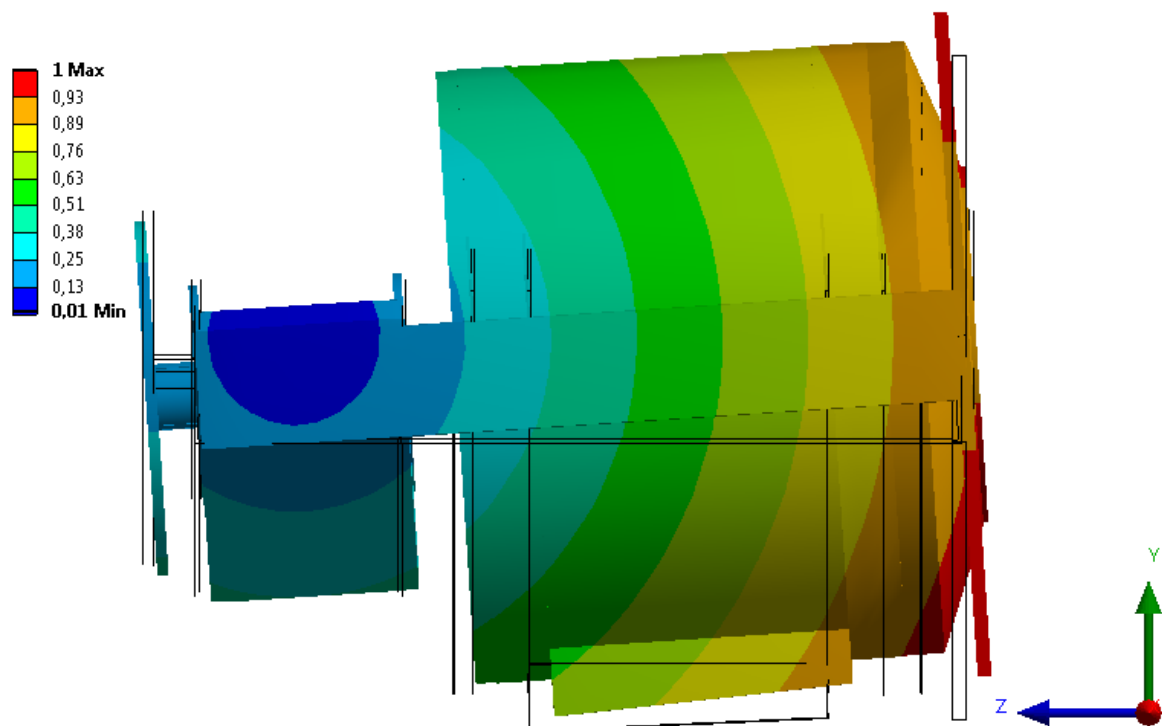
Obr. 26 Zobrazení pole posuvů 2. vlastního tvaru

3. vlastní tvar s vlastní frekvencí 2,471 Hz

Soustava se natáčí pouze kolem osy x.



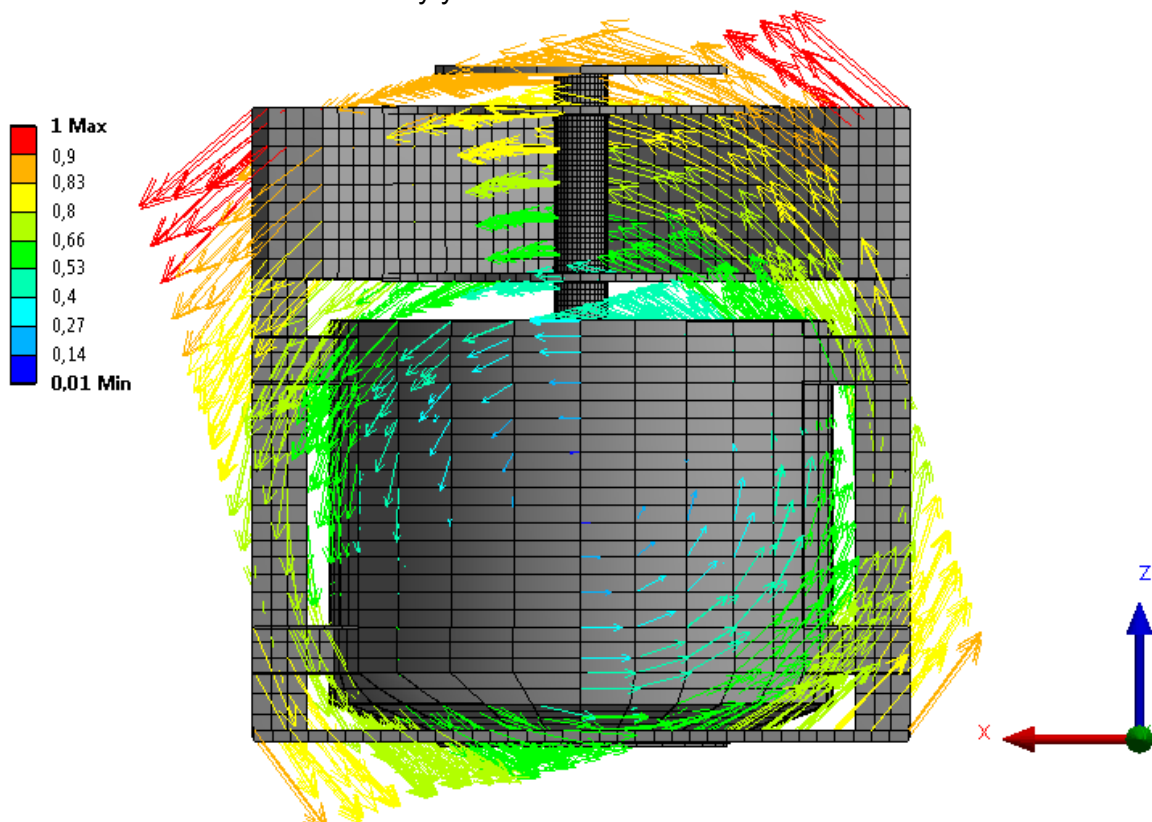
Obr. 27 Vektorové zobrazení 3. vlastního tvaru



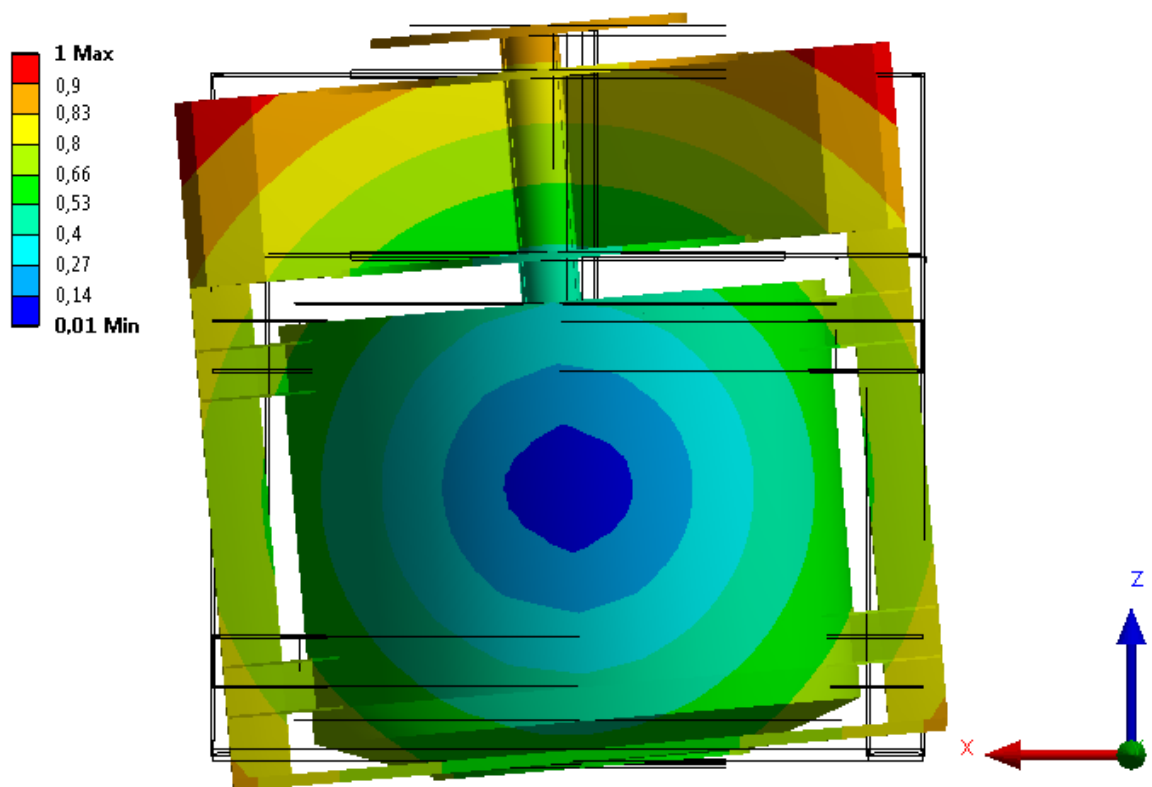
Obr. 28 Zobrazení pole posuvů 3. vlastního tvaru

4. vlastní tvar s vlastní frekvencí 2,658 Hz

Soustava se natáčí kolem osy y.



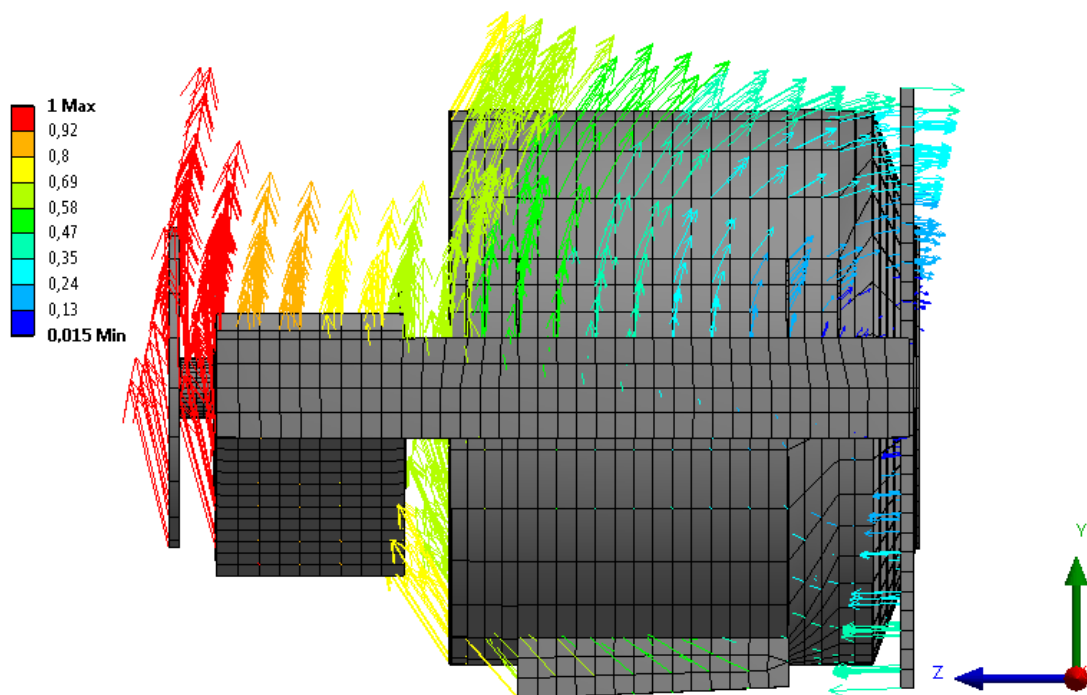
Obr. 29 Vektorové zobrazení 4. vlastního tvaru



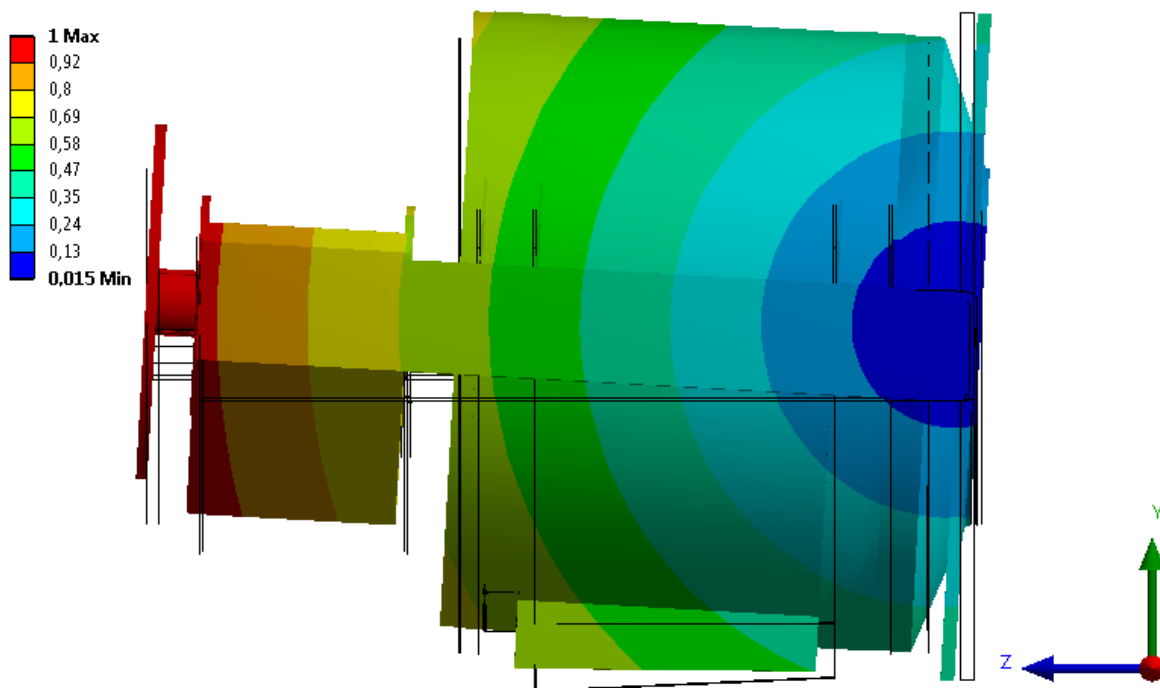
Obr. 30 Zobrazení pole posuvů 4. vlastního tvaru

5. vlastní tvar s vlastní frekvencí 2,905 Hz

Hlavním pohybem součásti je natáčení kolem osy x.



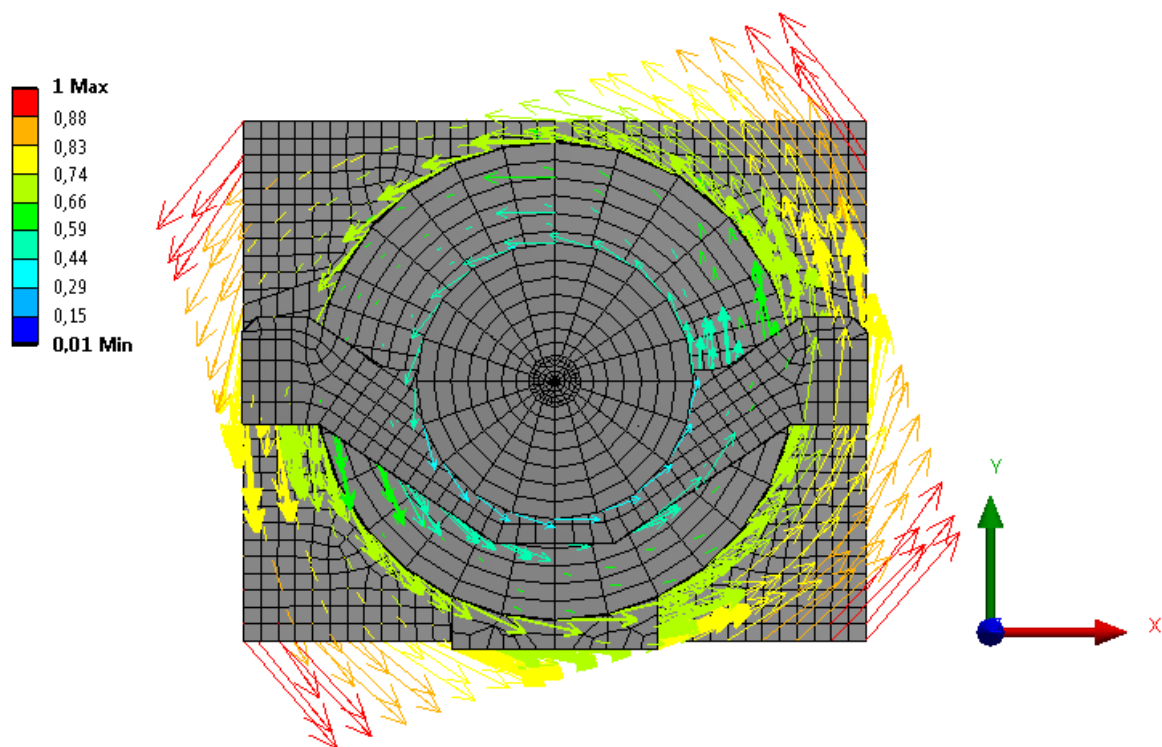
Obr. 31 Vektorové zobrazení 5. vlastního tvaru



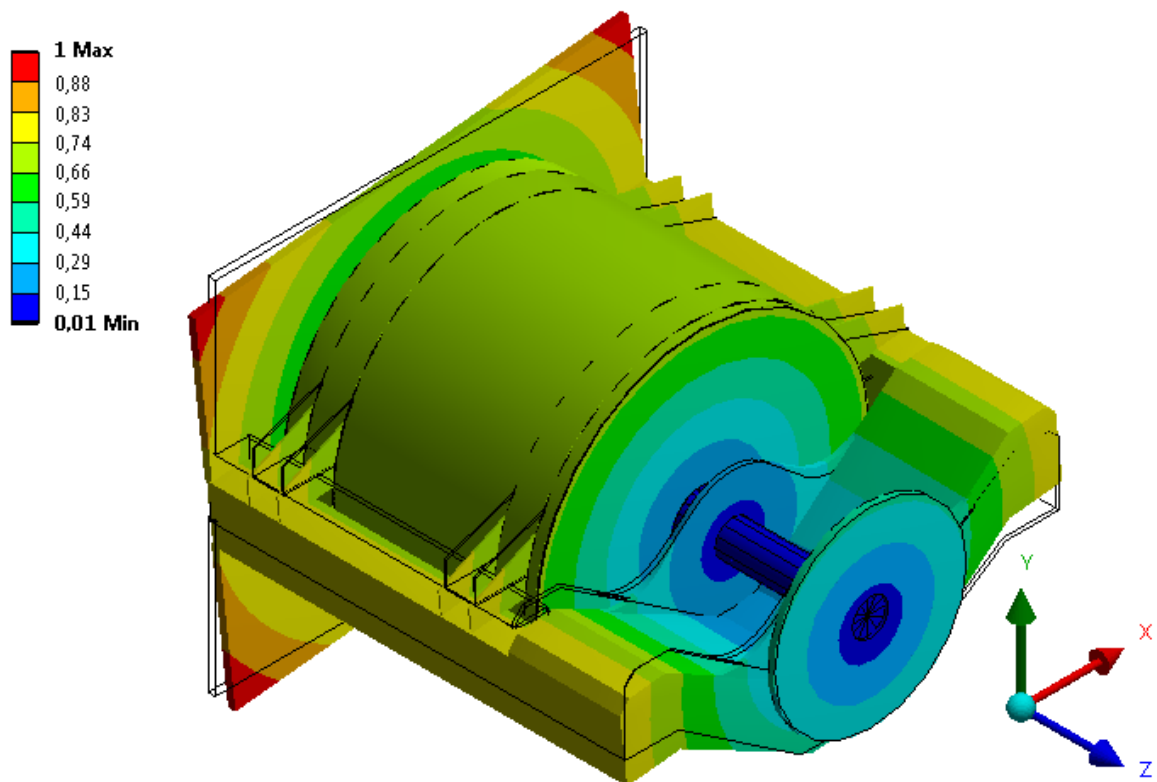
Obr. 32 Zobrazení pole posuvů 5. vlastního tvaru

6. vlastní tvar s vlastní frekvencí 3,971 Hz

Soustava se natáčí kolem osy z.



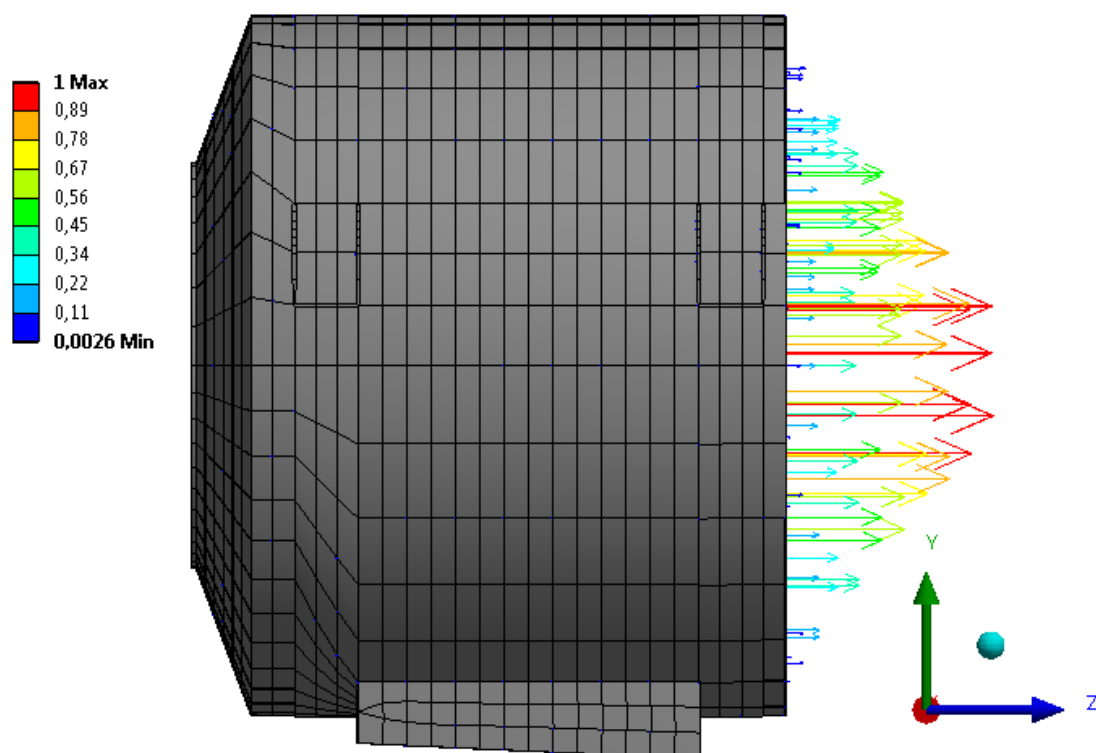
Obr. 33 Vektorové zobrazení 6. vlastního tvaru



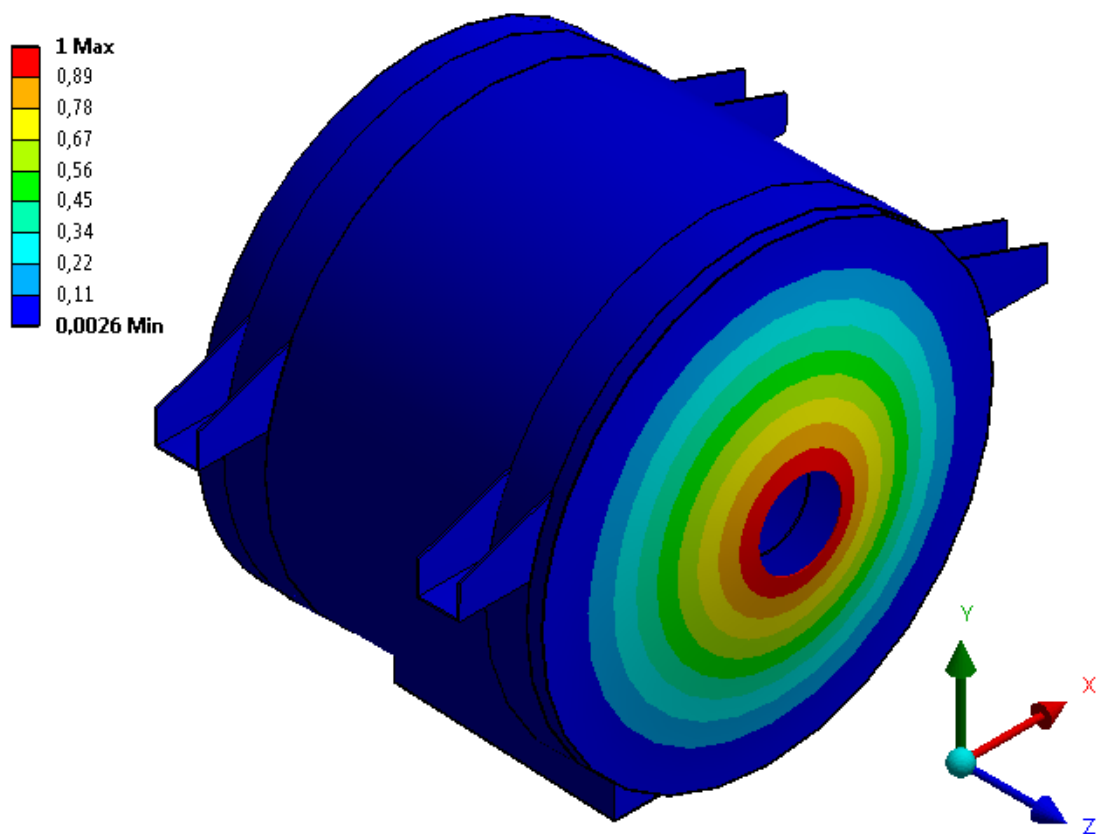
Obr. 34 Zobrazení pole posuvů 6. vlastního tvaru

7. vlastní tvar s vlastní frekvencí 23,597 Hz

Při této frekvenci kmitá pouze zadní čelo vnějšího bubnu.



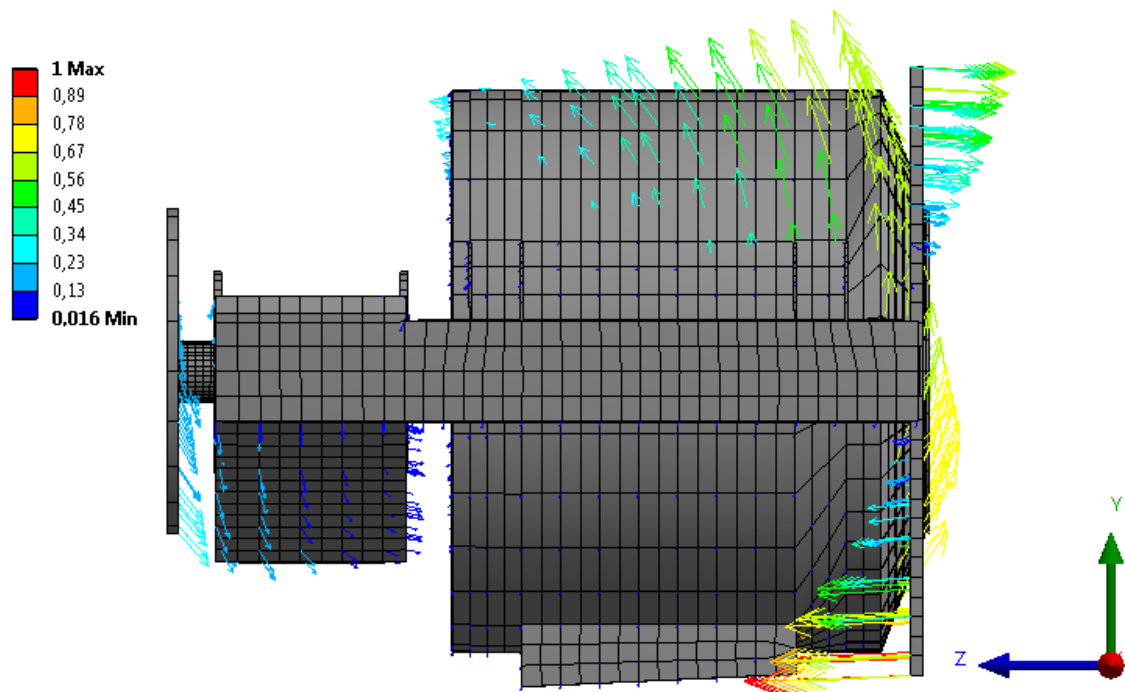
Obr. 35 Vektorové zobrazení 7. vlastního tvaru



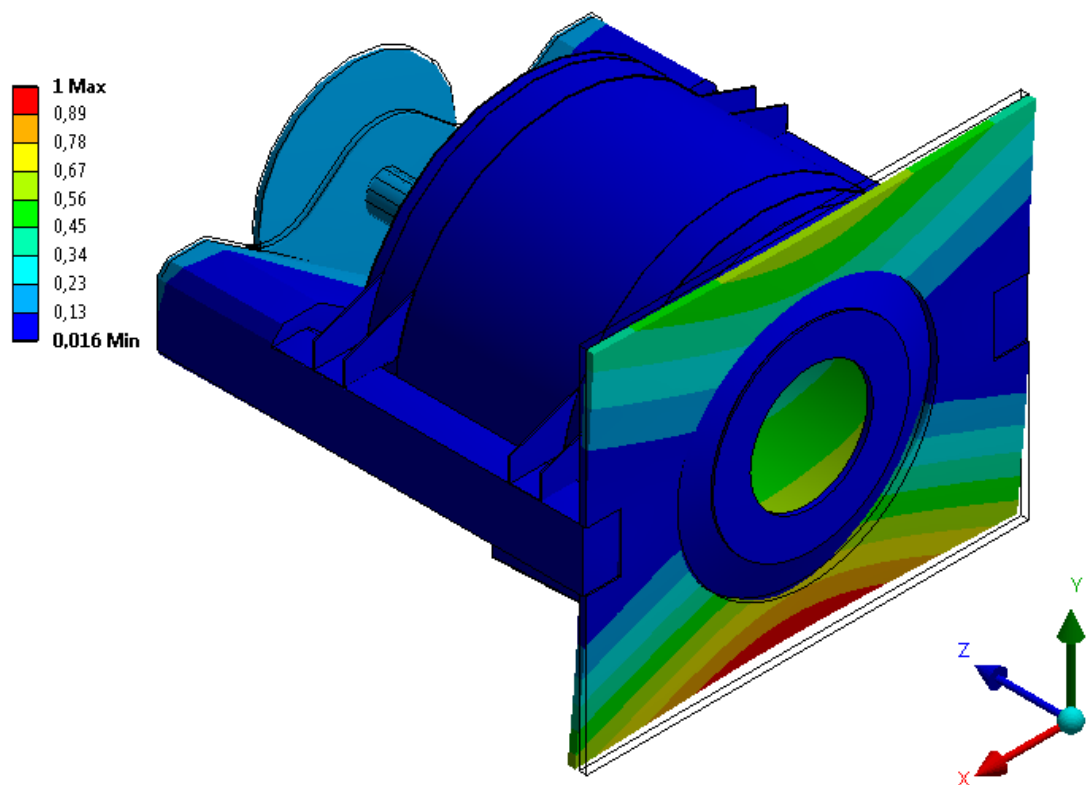
Obr. 36 Zobrazení pole posuvů 7. vlastního tvaru

8. vlastní tvar s vlastní frekvencí 28,832 Hz

Při této frekvenci se soustava natáčí kolem osy x. Největší posunutí je na spodní části předního čela rámu.



Obr. 37 Vektorové zobrazení 8. vlastního tvaru



Obr. 38 Zobrazení pole posuvů 8. vlastního tvaru

7 ŘEŠENÍ HARMONICKÉ ANALÝZY

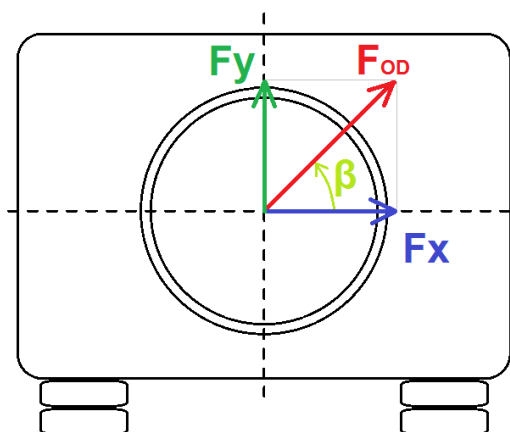
Jak už již bylo zmíněno, cílem harmonické analýzy je zjištění odezvy součásti nebo soustavy na buzení (v našem případě se jedná o buzení odstředivou silou na vnitřní buben pračky). Výsledky dynamického výpočtu mají formu dvou výstupních dat, které odpovídají reálné a imaginární složce výsledků. Tyto údaje představují libovolné výstupní veličiny, které lze rekonstruovat dle následujícího vzorce.

$$výsledek_{(t)} = reálná \cdot \cos(\omega \cdot t) + imaginární \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (7.1)$$

Harmonické buzení je definováno jako buzení odstředivou silou, kterou způsobuje rotace nevývažku o hmotnosti 23 kg (jedná se tedy o 20 % maximální kapacity praného prádla) při otáčkách 600 ot/min (takto vysoké otáčky se používají k odstředění vody z praného prádla, při pracím cyklu se buben otáčí přibližně 33 ot/min). Excentricita (vzdálenost těžiště nevývažku od středu rotace) je 0,61 m. Dále je potřeba vypočítat hodnotu budící frekvence a velikost odstředivé síly dle následujících vzorců.

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 10 \text{ Hz} \quad (7.2)$$

$$F_{OD} = m_n \cdot r_n \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = 55\,388 \text{ N} \quad (7.3)$$



Na Obr. 39 je zobrazena odstředivá síla, která je výslednicí síly F_x a síly F_y . Dále je na obrázku zakótován úhel β , který je roven součinu úhlové rychlosti s časem. Vzorec bude vypadat takto $\beta = \omega \cdot t$.

Obr. 39 Schéma působení odstředivé síly

Velikost síly F_x z Obr. 43 můžeme zapsat následovně.

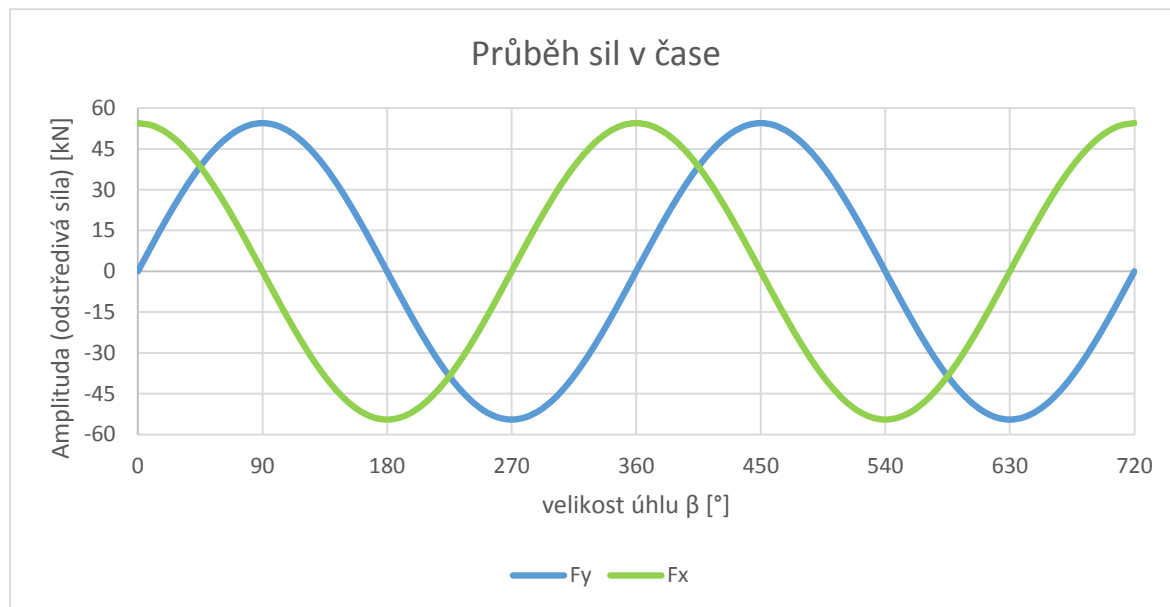
$$F_x = F_{OD} \cdot \cos(\omega \cdot t) = F_{OD} \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma) \quad (7.4)$$

kde úhel γ je fázový posuv a jeho velikost je $\frac{\pi}{2}$, neboli 90° .

Velikost síly F_y z Obr. 43 můžeme zapsat následovně.

$$F_y = F_{OD} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (7.5)$$

Průběh těchto dvou sil si vykreslíme v grafu.



Graf 2 Průběh sil F_x a F_y v závislosti na úhlu β

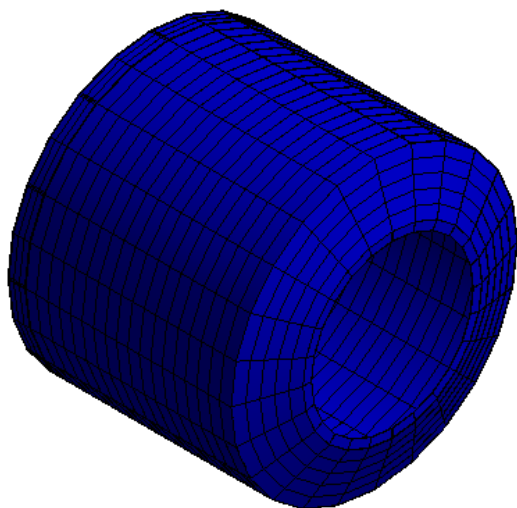
Na grafu lze vidět, že když je síla F_x maximální, tak je síla F_y nulová. Při jakékoliv hodnotě na ose x je odmocnina ze součtu kvadrátů obou složek sil rovna amplitudě F_{OD} .

V našem případě budeme zadávat do softwaru velikost amplitudy F_{OD} [N] a fázový úhel γ [°]. V první okrajové podmínce bude vodorovná síla rovna 55 388 N, svislá síla bude rovna nule a fázový posuv bude také roven nule. V druhé okrajové podmínce bude vodorovná síla rovna nule, svislá síla bude rovna 55 388 N a fázový posuv bude roven 90°. Tyto okrajové podmínky působí na vnitřní buben pračky.

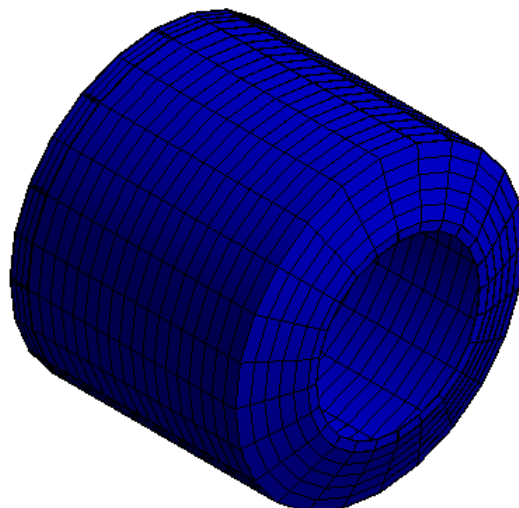
Dalším důležitým parametrem, který se zadává do výpočetního softwaru je budící frekvence, která bude na soustavu působit. Jak již bylo výše zmíněno, velikost budící frekvence je 10 Hz a její hodnota je závislá na otáčkách vnitřního bubnu.

Výsledky lze zobrazit animací po dobu jedné periody odezvy. Protože animace nelze zobrazit na papíře, budou výsledky zobrazeny staticky a to následujícím způsobem. Na následujících dvou stránkách budou zobrazeny pole posunutí ve směru osy x. Tyto průběhy budou vyobrazeny na dvanácti obrázcích od fázového posuvu 0° do fázového posuvu 330° s krokem 30°. Kdybychom z těchto obrázků vytvořili animaci, tak získáme jednu periodu odezvy.

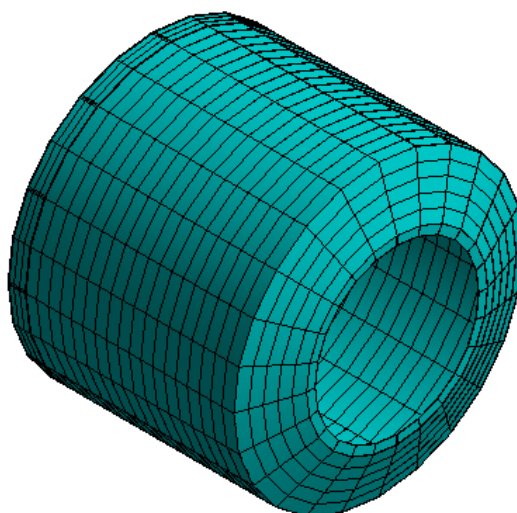
7.1 Zobrazení pole posuvů v ose x



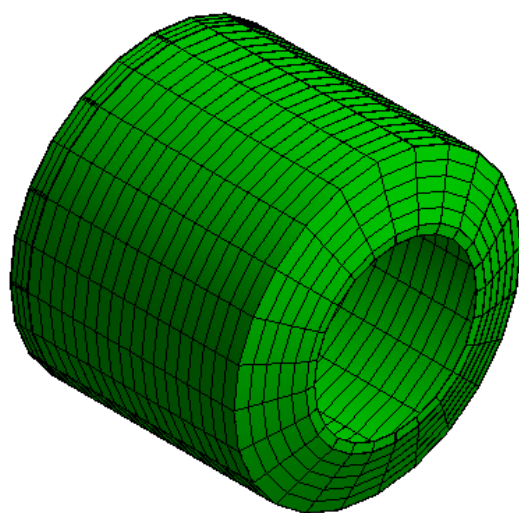
Obr. 40 Posunutí -6,7 mm při $\gamma = 0^\circ$



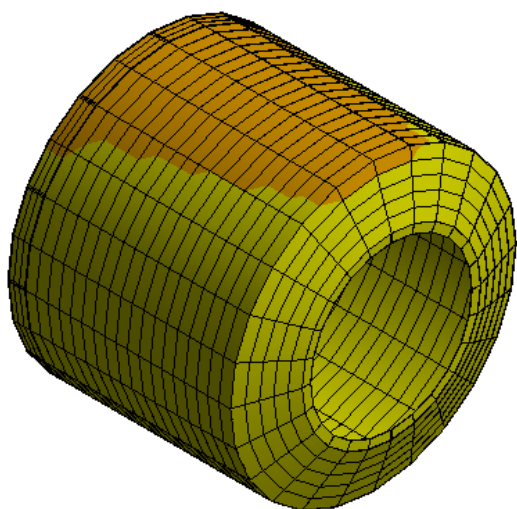
Obr. 41 Posunutí -6,7 mm při $\gamma = 30^\circ$



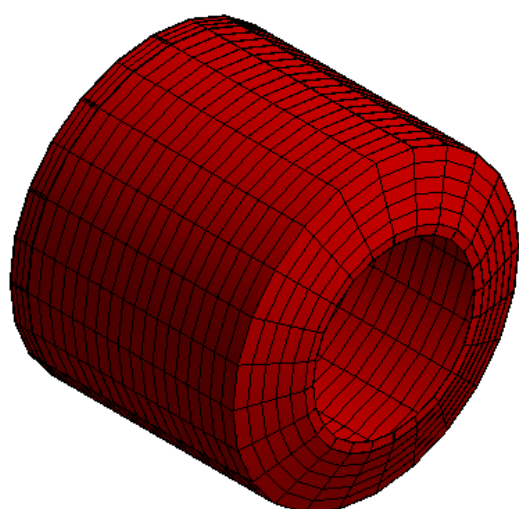
Obr. 42 Posunutí -3,7 mm při $\gamma = 60^\circ$



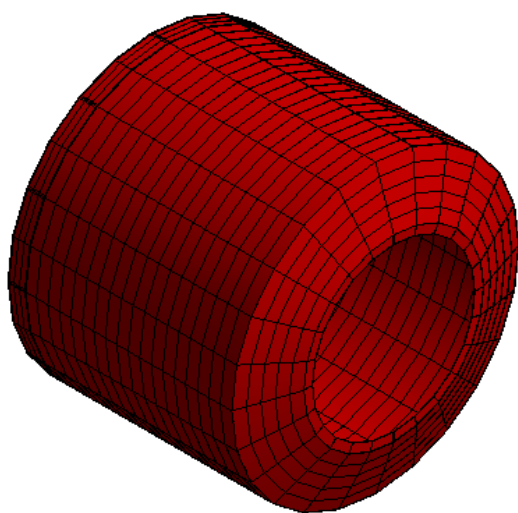
Obr. 43 Posunutí 0 mm při $\gamma = 90^\circ$



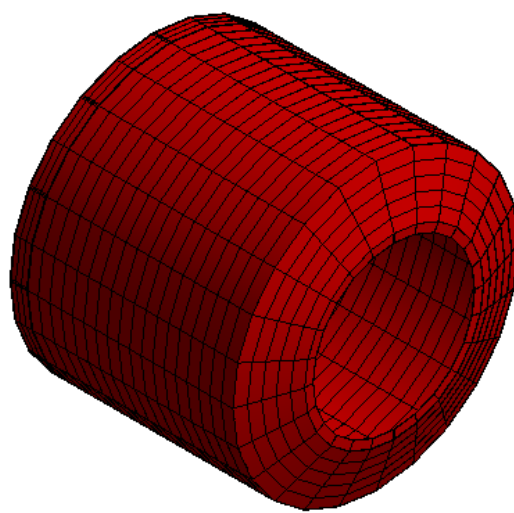
Obr. 44 Posunutí 3,7 mm při $\gamma = 120^\circ$



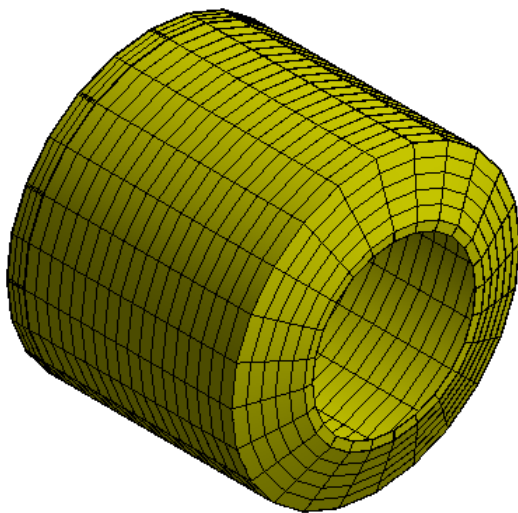
Obr. 45 Posunutí 6,7 mm při $\gamma = 150^\circ$



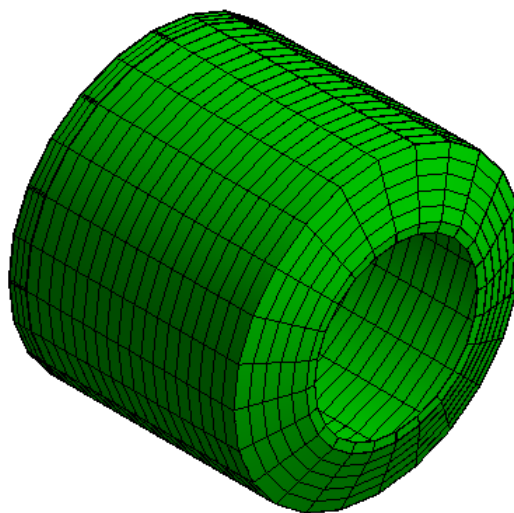
Obr. 46 Posunutí 6,7 mm při $\gamma = 180^\circ$



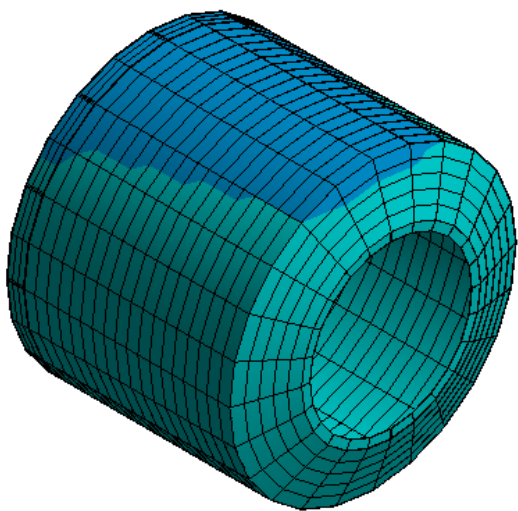
Obr. 47 Posunutí 6,7 mm při $\gamma = 210^\circ$



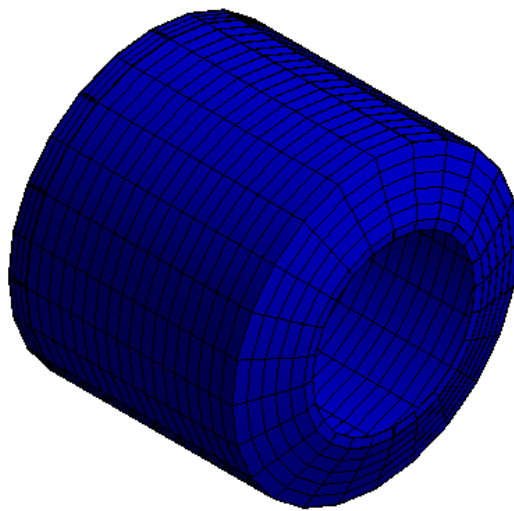
Obr. 48 Posunutí 3,7 mm při $\gamma = 240^\circ$



Obr. 49 Posunutí 0 mm při $\gamma = 270^\circ$



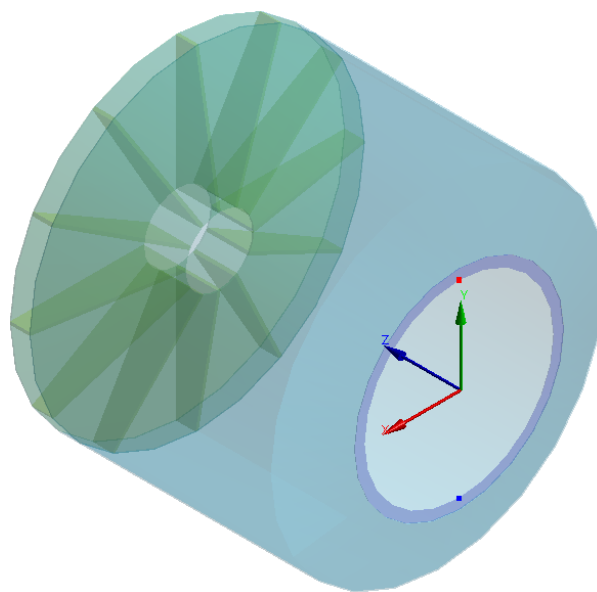
Obr. 50 Posunutí -3,7 mm při $\gamma = 300^\circ$



Obr. 51 Posunutí -6,7 mm při $\gamma = 330^\circ$

7.2 Zobrazení časového průběhu posunutí bodu

Nyní je třeba zkonstruovat časový průběh posunutí ve směru osy x pro zvolený bod. Na Obr. 52 je zobrazena poloha horního (červeně) bodu. K tomu je zapotřebí znát dvě posunutí horního bodu a každé musí být při jiném fázovém posuvu. Ideální je však zvolit rozdíl fázového posuvu 90° , protože si tím ulehčíme výpočet. Použijeme tedy první fázový posuv φ_1 a druhý fázový posuv, který bude roven $\varphi_1 + 90^\circ$. Můžeme tedy zapsat dva následující vztahy.



Obr. 52 Zobrazení polohy horního a dolního bodu

$$u_{(x)t1} = u_{(x)a} \cdot \sin(\varphi_1) = -6,3122 \text{ mm} \quad (7.6)$$

$$u_{(x)t2} = u_{(x)a} \cdot \sin(\varphi_1 + 90^\circ) = u_{(x)a} \cdot \cos(\varphi_1) = 0,5093 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Abychom získali výsledek fázového posuvu, můžeme tyto rovnice zapsat ve formě podílu a získáme následující vztah.

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{u_{(x)t1}}{u_{(x)t2}} = \frac{-6,3122}{0,5093} \quad (7.8)$$

Výsledný fázový posuv tedy bude mít tuto hodnotu.

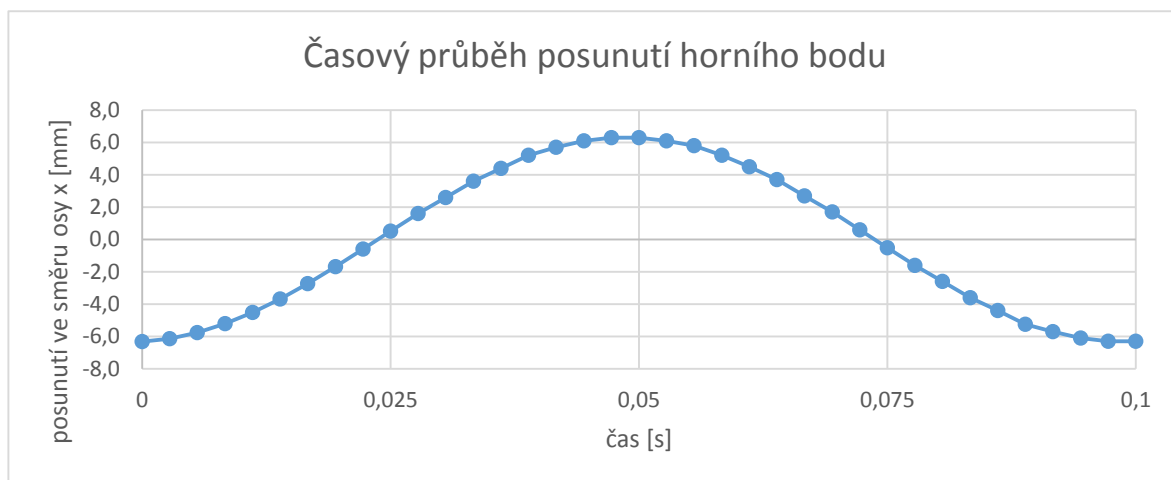
$$\varphi_1 = \arctan \frac{-6,3122}{0,5093} = -85,39^\circ \quad (7.9)$$

Dále potřebujeme získat velikost amplitudy. K tomu je vhodné sečíst kvadráty těchto dvou rovnic a získáme tuto rovnici.

$$u_{(x)a}^2 \cdot (\sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1) = (u_{(x)t1})^2 + (u_{(x)t2})^2 \quad (7.10)$$

$$u_{(x)a} = \sqrt{(u_{(x)t1})^2 + (u_{(x)t2})^2} = 6,33 \text{ mm}$$

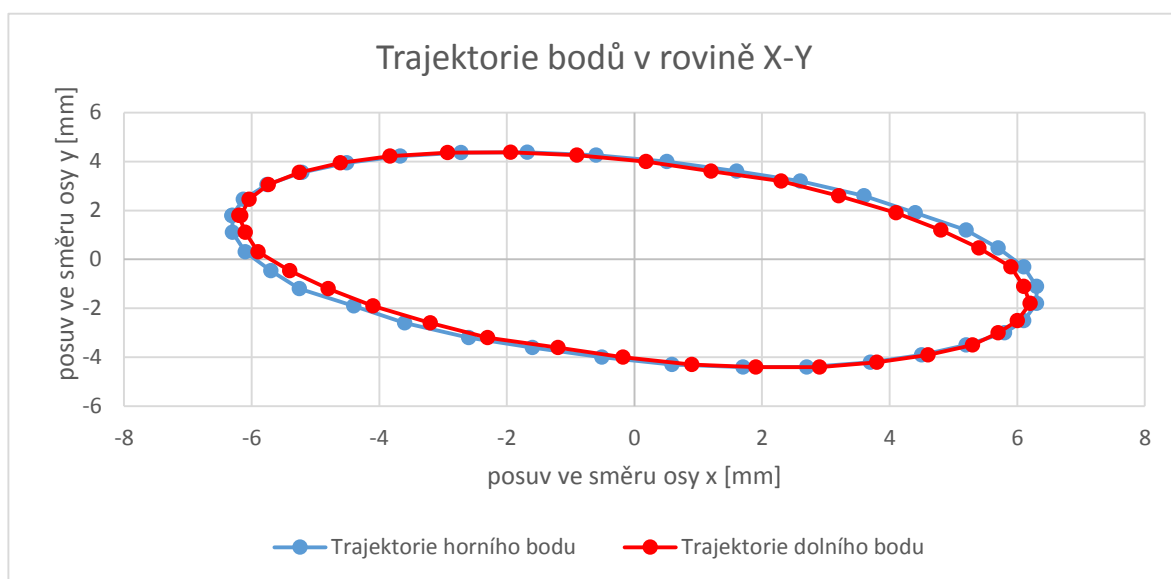
Nyní známe fázový posuv a amplitudu sinusovky a můžeme vykreslit časový průběh horního bodu.



Graf 3 Časového průběhu posunutí zvoleného bodu ve směru osy x

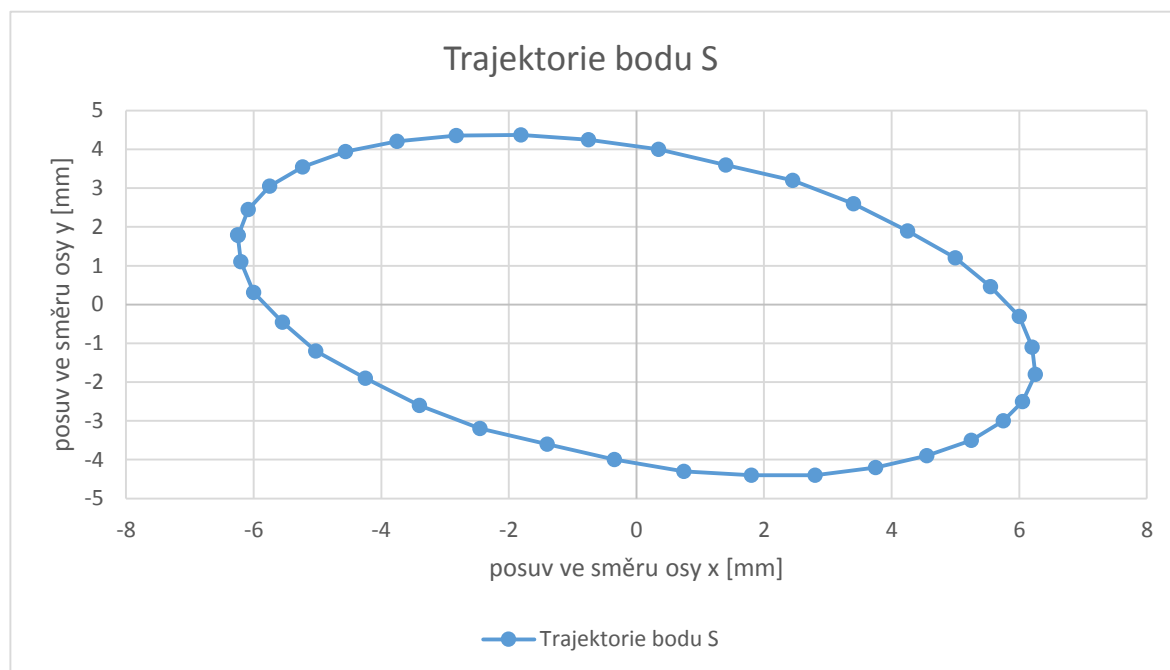
7.3 Zobrazení trajektorie dvou bodů

Pro znázornění pohybu nějaké části pračky jsem zvolil bod, který leží na ose rotace (osa z). Tento bod (nazveme ho například bod S) je průsečíkem osy z s přímkou, která prochází dvěma body, které jsou vyznačené na Obr. 52. Jedná se o horní (červeně) a dolní (modře) bod na předním čele vnitřního bubnu pračky. Abychom však tento graf mohli sestavit, musíme znát například hodnoty posunutí ve směru osy x a ve směru osy y pro fázové úhly 0° až 360° , například s kroky 10° (čím menší krok, tím přesnější bude průběh). Tyto hodnoty jsem si vypsál do Tab. 6 a poté jsem sestavil následující graf trajektorie.



Graf 4 Trajektorie horního a dolního bodu v rovině X-Y

Na grafu můžeme vidět, že posunutí dolního a horního bodu je přibližně stejné a to jak ve směru osy x, tak ve směru osy y. Z těchto dvou trajektorií můžeme udělat průměr a získáme posunutí pomyslného středového bodu S.



Graf 5 Trajektorie středního bodu S

Nakonec jsem vytvořil animace, na kterých je zobrazena jedna perioda průběhu harmonického kmitání.

Animace	Popis
Harmonic_1.avi	zobrazení pole posuvů vnitřního bubnu pračky ve směru osy x
Harmonic_2.avi	vektorové zobrazení celkového harmonického průběhu vnitřního bubnu pračky
Harmonic_3.avi	vektorové zobrazení celkového harmonického průběhu mechanismu pračky
Harmonic_4.avi	zobrazení celkového harmonického průběhu mechanismu pračky

Tab. 5 Názvy animací a jejich popis

8 VYHODNOCENÍ A ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření MKP modelu mechanismu pračky a zjištění jeho dynamických vlastností a rozkmitu v provozních podmínkách v komerčním výpočetním programu ANSYS Workbench 15.0. V úvodu práce jsem se věnoval popisu vývoje pračky od ručního praní prádla, přes různé druhy pracích strojů až po současné automatické pračky. Také jsem v úvodu uvedl tři české nejznámější výrobce průmyslových praček.

Druhá kapitola popisuje problém, který jsem v této práci řešil. V této kapitole je také znázorněn na obrázku geometrický model mechanismu pračky. Dále je popsáno, z jakého důvodu je třeba znát vlastní tvary mechanismu pračky a odezvu mechanismu pračky na buzení.

Třetí kapitolu jsem věnoval teoretické části technického kmitání a následnému řešení úlohy průmyslové pračky, ovšem s jiným konstrukčním řešením a značným zjednodušením. Jednalo se o příklad analytického výpočtu kmitání se třemi stupni volnosti. Tato úloha je rozdělena do dvou částí. V první části je provedena modální analýza, tedy nalezení vlastních tvarů a vlastních frekvencí. Druhá část obsahuje harmonickou analýzu, tedy zjištění odezvy součásti nebo soustavy na buzení (v našem případě se jedná o buzení odstředivou silou na pračku).

V další kapitole jsou popsány podrobně všechny komponenty mechanismu. Na obrázcích jednotlivých komponent jsou barevně rozlišené tloušťky jednotlivých částí. Jedná se tedy o Vnitřní buben pračky, rám pračky, vnější buben pračky a sestavu hřídele. Tyto součásti již měly svoji geometrii zadanou. Dále je v této kapitole uveden návrhový výpočet vzduchového měchu, na kterých je celý mechanismus uložen. Návrhový výpočet je počítán z celkové hmotnosti sestavy pračky a výsledkem výpočtu je konstrukční výška vzduchového měchu 120 mm a velikost vnitřního tlaku vzduchového měchu 4,99 bar. Výsledná vertikální tuhost měchu má hodnotu 134 kN/m a horizontální tuhost měchu má hodnotu 60 kN/m. Další důležitou součástí mechanismu jsou tlumiče, které mají koeficient tlumení 3 234 N·s/mm.

Pátá kapitola se zabývá tvorbou modelu pro metodu konečných prvků. Na začátku je v šesti bodech popsán princip metody konečných prvků. Dále jsou vypsána důležitá data, která do analýzy vstupují, jako je například modul pružnosti v tahu pro použitý materiál, Poissonovo číslo, tuhosti pružin a koeficient tlumení tlumičů. Také jsou popsány dva typy prvků, které jsou při vytváření modelu pračky použity. Prvním použitým prvkem je

skořepina, kde dva rozměry jsou mnohem větší, než je ten třetí rozměr (například u plechů). Druhým použitým prvkem je solid.

Následující kapitola popisuje postup při výpočtu vlastních tvarů a vlastních frekvencí v komerčním výpočetním softwaru ANSYS Workbench 15.0. Byly vyhodnoceny výsledky pro prvních 8 vlastních tvarů a 8 vlastních frekvencí. Prvních 6 vlastních frekvencí je relativně nízkých, protože mechanismus pračky je uložen na čtyřech vzduchových měšcích. Další vlastní frekvence mají vyšší hodnotu, protože se jedná o deformaci jednotlivých dílů mechanismu pračky. Výsledky jsou pak normovány na jedničku a zobrazeny na Obr. 23 až Obr. 38. Každý vlastní tvar je zobrazen na dvou obrázcích. První obrázek je vždy zobrazen vektorově, kde šípky ukazují směr pohybu a velikost šípky pak velikost posuvu. Na druhém obrázku jsou zobrazeny černou barvou hrany mechanismu pračky v původní poloze a barevně je zobrazena velikost posunutí podle barevné stupnice na obrázku. Animace zobrazující jednu periodu průběhu kmitání jednotlivých vlastních tvaru jsou přiloženy v elektronické příloze.

Poslední kapitola se zabývá harmonickou analýzou mechanismu pračky. V tomto případě se jednalo o buzení odstředivou silou vzniklou rotací nevývažku, který má hmotnost 23 kg. Analýza byla provedena pro otáčky 600 ot/min, tedy při ždímání prádla. Těmto otáčkám odpovídá budící frekvence 10 Hz. Excentricita nevývažku má hodnotu 0,61 m. Pomocí těchto vstupních hodnot byla vypočítána velikost odstředivé síly, která se spolu s budící frekvencí zadává do použitého výpočetního softwaru. Výsledky jsou zobrazeny třemi způsoby. Prvním způsobem je zobrazení posuvu (ve směru osy x) vnitřního bubnu staticky, to znamená, že bude zobrazeno 12 obrázků, první bude s fázovým úhlem 0° , další s krokem 30° a poslední s fázovým úhlem 330° . Druhým způsobem je zobrazen časový průběh posunutí horního bodu vyznačeného na Obr. 52. Tímto výpočtem jsme zjistili, že velikost amplitudy $u_{(x)a} = 6,33 \text{ mm}$ a hodnota fázového posuvu $\varphi_1 = -85,39^\circ$. Pomocí těchto dvou hodnot byl sestrojen časový průběh posunutí horního bodu ve směru osy x. Nakonec jsem vypsál do tabulky hodnoty posunutí s krokem fázového posuvu po 10° pro horní i dolní bod ve směru osy x i ve směru osy y a z těchto vypsáných dat jsem pak sestrojil trajektorie pohybu těchto bodů. Dále byly hodnoty horního a dolního bodu zprůměrovány a tím jsme získali trajektorie pomyslného bodu S. Je třeba dodat, že vyhodnocení výsledků můžeme provést pro jakoukoliv část mechanismu. Animace, zobrazující jednu periodu průběhu harmonického kmitání, jsou přiloženy v elektronické příloze.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ONDROUCH, J.; PODEŠVA, J. *Technické kmitání*. 1. Vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2011/12, 179 s. Dostupné v elektronické podobě na webových stránkách Katedry mechaniky.
- [2] BITTNAR, Z.; ŘEŘIČKA, P. *Metoda konečných prvků v dynamice konstrukcí*. 1.Vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 257 s.
- [3] *Engineering Manual Design Guide – Metric*. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://tesairsprings.com.au/fileadmin/filemount/firestone/Engineering_Manual___Design_Guide_-_Metric_MEMDG.pdf
- [4] *Profesionální prádelenská technika Primus*. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.primuslaundry.com/cz/>
- [5] *MERON, a.s. - profesionální zařízení pro prádelny*. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.meron.cz/>
- [6] *Prádelenská zařízení - vybavení prádelen*. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.pradelenska-zarizeni.cz/>
- [7] *Muzeum Svitavy – sbírky, výstavy, expozice, knihovny*. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.muzeum.svitavy.cz/index.php?L=1>

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Podešvovi, Ph.D., jehož odborné rady a připomínky byly pro mě cennou inspirací při vypracování mé bakalářské práce.

PŘÍLOHY

úhel [°]	Horní bod		Dolní bod		Bod S	
	X	Y	X	Y	X	Y
0	-6,31	1,79	-6,17	1,78	-6,24	1,785
10	-6,13	2,45	-6,04	2,45	-6,085	2,45
20	-5,76	3,05	-5,74	3,05	-5,75	3,05
30	-5,21	3,55	-5,25	3,55	-5,23	3,55
40	-4,51	3,94	-4,61	3,94	-4,56	3,94
50	-3,67	4,21	-3,83	4,21	-3,75	4,21
60	-2,72	4,36	-2,93	4,36	-2,825	4,36
70	-1,68	4,37	-1,94	4,37	-1,81	4,37
80	-0,6	4,25	-0,9	4,25	-0,75	4,25
90	0,51	4	0,18	4	0,345	4
100	1,6	3,6	1,2	3,6	1,4	3,6
110	2,6	3,2	2,3	3,2	2,45	3,2
120	3,6	2,6	3,2	2,6	3,4	2,6
130	4,4	1,9	4,1	1,9	4,25	1,9
140	5,2	1,2	4,8	1,2	5	1,2
150	5,7	0,46	5,4	0,46	5,55	0,46
160	6,1	-0,31	5,9	-0,31	6	-0,31
170	6,3	-1,1	6,1	-1,1	6,2	-1,1
180	6,3	-1,8	6,2	-1,8	6,25	-1,8
190	6,1	-2,5	6	-2,5	6,05	-2,5
200	5,8	-3	5,7	-3	5,75	-3
210	5,2	-3,5	5,3	-3,5	5,25	-3,5
220	4,5	-3,9	4,6	-3,9	4,55	-3,9
230	3,7	-4,2	3,8	-4,2	3,75	-4,2
240	2,7	-4,4	2,9	-4,4	2,8	-4,4
250	1,7	-4,4	1,9	-4,4	1,8	-4,4
260	0,59	-4,3	0,9	-4,3	0,745	-4,3
270	-0,51	-4	-0,18	-4	-0,345	-4
280	-1,6	-3,6	-1,2	-3,6	-1,4	-3,6
290	-2,6	-3,2	-2,3	-3,2	-2,45	-3,2
300	-3,6	-2,6	-3,2	-2,6	-3,4	-2,6
310	-4,4	-1,9	-4,1	-1,9	-4,25	-1,9
320	-5,25	-1,2	-4,8	-1,2	-5,025	-1,2
330	-5,7	-0,46	-5,4	-0,46	-5,55	-0,46
340	-6,1	0,31	-5,9	0,31	-6	0,31
350	-6,3	1,1	-6,1	1,1	-6,2	1,1
360	-6,3	1,8	-6,2	1,8	-6,25	1,8

Tab. 6 Vypsané hodnoty posuvů ve směru osy X a Y pro horní a dolní bod

PŘÍLOHY V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ

TEXT BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- Holub_Radek_text_BP.pdf

TABULKA

- Holub_Radek_Hodnoty posuvů ve směru osy X a Y pro horní a dolní bod.xlsx

ANIMACE

- Mode_1.avi – 1. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_2.avi – 2. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_3.avi – 3. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_4.avi – 4. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_5.avi – 5. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_6.avi – 6. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_7.avi – 7. vlastní tvar mechanismu pračky
- Mode_8.avi – 8. vlastní tvar mechanismu pračky
- Harmonic_1.avi – zobrazení pole posuvů vnitřního bubnu pračky ve směru osy x
- Harmonic_2.avi – vektorové zobrazení celkového harmonického průběhu vnitřního bubnu pračky
- Harmonic_3.avi – vektorové zobrazení celkového harmonického průběhu mechanismu pračky
- Harmonic_4.avi – zobrazení celkového harmonického průběhu mechanismu pračky